

## بررسی تغییرات شوری خاک در ارتباط با لندفرم‌های نواحی بیابانی شمال استان اصفهان

جعفر گنجعلی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران.  
امیرحسین حلبیان - گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.  
امیر کرم\* - گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران.  
شیلا حجه فروش نیا - عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹      تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

### چکیده

شوری خاک از مهمترین فرایندهایی است که رشد گیاهان را محدود و موجبات گسترش پدیده بیابان‌زایی و تخریب اراضی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند. توزیع شوری خاک در لندفرم‌های مختلف و تغییرات آن در طول زمان و پیش‌بینی الگوهای شوری سهم بسزایی در مدیریت محیط در نواحی خشک و نیمه‌خشک و بیابانی دارد. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات پدیده شوری خاک در لندفرم‌های بیابانی شمال استان اصفهان با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸، سنجنده‌های TM و OLI-TIRS در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ است. بدین منظور، ۲۰۰ تصویر در ۲۷ ماه گرم سال (از اول ژوئن تا آخر آگوست، معادل اوایل خرداد تا اوایل شهریور) در این دوره زمانی استخراج شد. پس از پیش‌پردازش‌های لازم تصاویر پوشش‌دهنده قلمرو مطالعاتی، شاخص‌های شوری NDSI، BI، SI-۱ و SI-۲ مورد ارزیابی و نقشه‌های مربوطه ترسیم شد. شاخص موقعیت توپوگرافی و طبقه‌بندی لندفرم‌های زمین بر پایه Topographic Position Index (TPI) نیز بررسی شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که روند تغییرات شاخص شوری از مناطق کوهستانی به سمت نقاط پست افزایش می‌یابد. وضعیت شاخص‌های شوری در لندفرم‌های مستخرج از TPI نشان داد که واحد برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات دارای کمترین میزان و واحد دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های گلی و رسی) دارای بالاترین مقادیر هستند. اختلاف بین این دو واحد لندفرمی در همه شاخص‌ها تقریباً در حدود ۰/۲ می‌باشد. بررسی شاخص‌های شوری در طبقات ارتفاعی نشان می‌دهد که این شاخص‌ها با ارتفاع کاهش می‌یابد، تا آستانه ۱۴۰۰ متری افت شاخص‌ها شدید و بعد از آن ملایم می‌شود. شاخص‌های شوری با افزایش شیب، کاهش نشان می‌دهند؛ تا شیب ۱۵ درجه افت شاخص‌های شوری با شیب تند و سپس تا شیب ۶۵ درجه با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد. شاخص‌های شوری چهار فاز تغییرات را نیز نشان داد که فاز چهارم از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ به مدت ۶ سال با روند افزایشی ادامه داشته است. نقشه‌های آینده برای سال ۲۰۳۰ نشان داد که محور جنوبی دق سرق شامل دشت‌سرهای واقع بین کاشان تا اردستان در وضعیت بحرانی قرار می‌گیرند که لزوم توجه مدیران و مهندسين محیط زیست و منابع طبیعی به این موضوع را مطالبه می‌کند.

واژگان کلیدی: شوری، بیابان‌زایی، لندفرم، شاخص‌های شوری، مولفه‌های توپوگرافیک.

## مقدمه

شوری خاک در دهه‌های اخیر به دلیل رشد روز افزون جمعیت در جهان و به ویژه در کشورهای در حال توسعه، در زمره مخاطرات زیست محیطی مطرح گردیده که خطری بسیار جدی برای زندگی ساکنین مناطق مستعد بیابان‌زایی مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک و خشک و خشک نیمه مرطوب است. این مسئله روند بیابان‌زایی در مناطق فوق تحت تاثیر کاهش نزولات جوی و افزایش تدریجی دما را تشدید کرده است. هرچند که شوری خاک مانند سایر مخاطرات محیطی اثرات سریع و آنی ندارد (مترنیچت و زینک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳)؛ اما به دلیل پیامدهایی که در زندگی بشر دارد در دنیای امروز بسیار مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یک مخاطره شدید مدنظر قرار می‌گیرد (یو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰). در عین حال، شوری به عنوان یکی از ۷ عامل بیابان‌زایی بشمار می‌رود و ۸۰٪ علت بیابان‌زایی را شامل می‌شود (کرم و همکاران، ۱۳۹۸). اساساً بیابان‌زایی را می‌توان فرآیندی دانست که طی آن بخشی از حاصلخیزی طبیعی خاک به دلایلی همچون بهره‌برداری های نادرست، ماندابی شدن اراضی، شور و سدیمی شدن خاک از دست می‌رود. به عبارت دیگر، بیابان‌زایی به تخریب زمین و کاهش قابلیت‌های تولید معیشتی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک و نیمه مرطوب می‌انجامد. این پدیده در نتیجه عوامل گوناگون، از جمله فعالیت‌های بشر و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد (کی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲).

کشور ایران با قرارگیری در کمربند یابانی نیمکره شمالی در قلمرو مناطق خشک جهان قرار دارد و به لحاظ بارش و آبشویی کم و نرخ تبخیر پتانسیل بسیار بالا و همچنین سازندهای تبخیری و شور زمین‌شناسی، با معضل شوری اراضی مواجه است. از طرف دیگر استان اصفهان که در قسمت مرکزی فلات ایران واقع شده، یکی از استان‌های خشک ایران بشمار می‌رود. بخش‌های شمالی استان اصفهان به طور خاص بیشتر با مسئله خشکی و شوری خاک مواجه است که این موضوع توجه کننده ضرورت پژوهش حاضر می‌باشد. چنانچه بتوان ارتباطی بین داده‌های رقومی ماهواره‌ای و شوری خاک برقرار نمود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قادر خواهد بود، تخمین شوری خاک را در سطح منطقه تسهیل و دسترسی به نقاط دور یا خارج از دسترس را فراهم آورد. پایش مداوم پدیده شوری خاک از اهم مشکلات کشت و زرع به‌ویژه در پهنه‌هایی است که میزان تبخیر و تعرق از بارش سالانه فزونی گرفته است (متین فر و ظهرنیا، ۱۳۹۷). در اثر ازدیاد جمعیت، آب‌های زیرزمینی برای آبیاری، استفاده شهری، صنعتی و شرب، با حفر چاه‌های مجاز و غیرمجاز استخراج می‌گردند. استخراج این‌گونه آب‌های زیرزمینی باعث افزایش تبخیر از آن و در نتیجه بالا آمدن و تجمع نمک و بروز پدیده شوری در سطح خاک شده است (خواجه‌الدین، ۱۳۸۶ و امیراصلانی و همکاران، ۲۰۱۱). از آن جایی که ماهیت، وسعت، شدت و پراکنش مکانی و زمانی شوری خاک به عنوان پدیده‌ای پویا همواره بایستی مورد رصد و پایش قرار گیرد؛ بنابر این بهره‌گیری از داده‌های عددی چند طیفی ماهواره‌ای نظیر لندست که توانمندی بالایی برای برآورد پهنه‌ای شوری خاک در مقایسه با اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای دارند؛ رهگشا بوده و ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (اذاب‌دفتری و سونار<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶ و اولید و کومار<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳).

مهمترین فاکتورهایی که در ارتباط با شوری خاک می‌باشند و مورد بررسی پژوهشگران مختلف قرار گرفته است؛ شامل نوع خاک (فانگ و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۰۵)، کیفیت آب (چهابرا<sup>۷</sup>، ۱۹۹۶)، لندفرم (فانگ و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵)، بافت خاک (وانگ و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۲)، موقعیت

1- Metternich and Zink

2 - Yu et al

3- Qi et al

4- Azabdaftari & Sunar

5- Allbed & Kumar

6- Fang et al

7- Chhabra

8- Fang et al

9- Wang et al

سطح ایستایی (نورثی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶)، آبیاری و الگوهای کشت (هافن و برسلا<sup>۲</sup>، ۱۹۸۶؛ باسیل و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲؛ هانگ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱؛ فن و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰) و کاربری زمین (ژانگ و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱؛ سلیک و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۵) می‌باشد. پژوهشگران بسیاری در نقاط مختلف دنیا اقدام به تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، تکنیک‌های زمینی و رادیومتری، بر اساس همبستگی بین انعکاس‌های مربوط به حضور نمک و شاخص‌های شوری خاک کردند. در این زمینه، ارتباط بین لندفرم و ویژگی‌های خاک توسط پارک و بورت<sup>۸</sup> (۲۰۰۲)، هندرسون و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۵) و مینیو همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۷) بررسی قرار گرفته است. فرناندز بوسس و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۶) برای نقشه‌برداری شوری خاک در منطقه تکسکوکو مکزیک از داده‌های رقومی ETM+ و عکس‌های هوایی استفاده کردند. نیلدو همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۷) نقشه خاک‌های سدیمی و گچی منطقه‌ای از آمریکا را با بهره‌گیری از داده‌های ETM+ و نسبت‌گیری طیفی تهیه کردند. علی و مقنم<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۳) ارتباط بین ویژگی‌های خاک (کربنات کلسیم، شوری خاک، pH، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منگنز و روی) در لندفرم‌های اطراف دریاچه ایدکو<sup>۱۴</sup> مصر را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها آشکار ساخت که لندفرم‌ها نقش اساسی در پراکنش ویژگی‌های خاک این منطقه دارند. آلبدو همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۴) باند ۳ تصاویر ماهواره‌ای آیکونوس ۲ را برای مطالعه شوری سطحی خاک در منطقه‌ای در عربستان انتخاب کردند. آنها بر اساس شاخص شوری (SI) و داده‌های زمینی، یک مدل رگرسیونی ساده خطی را اجرا و همبستگی معنی‌داری بین شوری سطحی خاک و شاخص شوری مزبور بدست آوردند. ال‌کبلای و همکاران<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۵) نشان دادند که ویژگی‌های خاک به طور گسترده‌ای توسط لندفرم‌ها در شمال امارات متحده عربی کنترل می‌شوند. الحاج<sup>۱۷</sup> (۲۰۱۶) با استفاده از شاخص‌های شوری (SI)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص شوری استاندارد شده (NDSI) به بررسی پدیده شوری خاک در اکوسیستم‌های خشک عربستان پرداختند. یافته‌ها نشان داد که شاخص شوری (SI-۹) توانایی برآورد شوری خاک منطقه مورد بررسی را دارد. ال‌هارتی<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده‌های TM و OLI نقشه شوری خاک دشت تادلا را در مرکز مراکش تهیه نمودند. یافته‌های آنان نشان از روند کاهشی شوری در این دشت داشت. ویتنی و همکاران<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و شاخص‌های EVI، NDVI و CRSI پدیده شوری خاک را در زمین‌های کشاورزی کالیفرنیا مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله آشکار شد که شاخص CRSI به صورت بارزتری توانسته است پدیده شوری را در منطقه مورد بررسی نشان دهد. مورگانو همکاران<sup>۲۰</sup> (۲۰۱۸) ضمن بهره‌گیری از تصاویر sentinel-2 و شاخص‌های پوشش گیاهی و روش شبکه عصبی مصنوعی اقدام به پیش‌بینی و مدل‌سازی شوری خاک در هندوستان کردند. نتایج نشان داد که مدل انتخابی قابلیت پیش‌بینی شوری خاک را با ضریب تبیین ۰/۹۴ دارا بوده است. هوا و همکاران<sup>۲۱</sup> (۲۰۱۹) به بررسی تغییرات شوری خاک در منطقه دلتای رودخانه

1- Northey et al

2- Hoffman and Bresler

3- Basile et al

4- Huang et al

5- Fan et al

6- Zhang et al

7- Celik

8- Park and Burt

9- Henderson et al

10- Mini et al

11- Fernandez-Buces et al

12- Nield et al

13- Ali and moghannam

14- Idku

15- Allbed et al

16- Keblawy et al

17- Elhag

18- Elharti

19- Whitney et al

20- Morgan et al

21- Hoa et al

مکونگ در ویتنام با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین پرداختند. نتایج نشان داد که مدل گوسین بیشترین دقت پیش‌بینی را در میان مدل‌های انتخابی داشته است.

در داخل کشور خنامانی و همکاران (۱۳۹۰) در حین بررسی وضعیت خاک با استفاده از سنجش از دور در دشت سگری اصفهان دریافتند که نقشه حاصل از تصاویر ماهواره‌ای از دقت بیشتری برای تهیه شاخص شوری خاک برخوردار است. اژیرابی و همکاران (۱۳۹۳) به پهنه‌بندی شوری خاک در منطقه گرگان با استفاده از تصاویر سنجنده ETM+ سال (۲۰۱۲) و شاخص‌های SI, NDSI, DVI, IPVI پرداختند. یافته‌ها نشان داد که شاخص SI بیشترین همبستگی را با داده‌های زمینی دارد. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۴) ضمن پایش نمکزارهای مناطق خشک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای LISSIII ماهواره IRS-P6 در منطقه کاشان و مهارلو به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های نمکزار RSC1, NDSC1 بهترین تفکیک‌پذیری را در این قلمرو مطالعاتی داشته است. محمودی و همکاران (۱۳۹۴) اقدام به پهنه‌بندی شوری خاک‌های منطقه جنوب شرق استان اصفهان با استفاده از داده‌های زمینی و سنجنده ماهواره ای TM کردند و دریافتند که بیش از ۸۶٪ توافق بین نقشه‌ها و داده‌های زمینی EC وجود دارد. اختری و اسدی (۱۳۹۵) با بهره‌گیری از تحلیل طیفی داده‌های سنجنده OLI و اطلاعات میدانی، پدیده شوری در جنوب دشت ملایر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از توانایی بالای سنجنده OLI در زمینه ارزیابی شوری خاک در منطقه مورد بررسی داشت. حبشی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از داده‌های سنجنده OLI و تحلیل عوارض توپوگرافی به ارزیابی شوری خاک در شرق اصفهان پرداختند. نتایج نشان داد که بهره‌گیری از پارامتر ارتفاع از سطح دریا در کنار داده‌های ماهواره‌ای در مطالعات شوری خاک این منطقه سبب بهبود دقت ارزیابی می‌شود. مکرم و نگهبان (۱۳۹۷) حین بررسی شوری آب و خاک و ارتباط آن با پستی و بلندی‌های سطح زمین در حوضه آبخیز سیاخ دارنگون به این نتیجه رسیدند که حداقل شوری خاک و آب به سبب جنس سازنده‌های منطقه و عدم شوری آنها در دشت‌ها واقع شده است. خالقی و همکاران (۱۳۹۸) بر اساس شاخص‌های حاصله از تصاویر لندست و استفاده از روش رگرسیون چند متغیره به پیش‌بینی پدیده شوری خاک در ارومیه و مدلسازی آن اقدام نمودند. نیک‌پور و همکاران (۱۴۰۰) به پایش شوری خاک به استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در استان ایلام پرداختند. یافته‌ها نشان داد که زمین‌های دارای خاک شور به سبب مجاورت با سازند گچساران، آبیاری با آب‌های زیرزمینی شور، جنس خاک و کم‌بودن آب در اغلب زمین‌ها در منطقه تماماً در غرب و جنوب‌غرب استان ایلام قرار دارند.

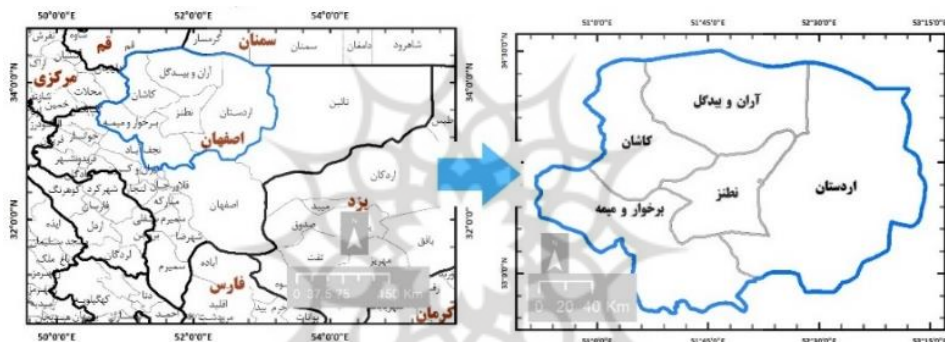
از آن جایی که گسترش دامنه پدیده شوری خاک و تخریب زمین‌های زراعی و مراتع در شمال استان اصفهان یکی از مخاطرات زیست محیطی در این قلمرو جغرافیایی بشمار می‌رود، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و بررسی این پدیده ناگوار در این گستره با بهره‌گیری از داده‌های عددی ماهواره‌ای به عنوان یکی از عوامل مهم تخریب سرزمین می‌پردازد. شاید زمینه‌ای برای برنامه‌ریزی مقوله بیابان‌زدایی و مدیریت خاک در منطقه، برای نیل به توسعه پایدار و بهبود شرایط محیطی فراهم شود.

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال استان اصفهان قرار گرفته که دارای مساحت ۳۳۴۸۶ کیلومتر مربع می‌باشد. به لحاظ تقسیمات سیاسی محدوده مورد مطالعه در شمال استان اصفهان و شامل شهرستان‌های آران و بیدگل، اردستان، نطنز و کاشان و برخوار و میمه می‌گردد (شکل ۱). بر اساس سرشماری نفوس و مسکن ۱۳۹۵ مجموع جمعیت شهرستان‌های فوق‌الذکر ۹۱۱۱۶۷ نفر می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در زون مرکزی ایران و زیر زون سه‌پند- بزمان یا ارومیه- دختر قرار گرفته است. ایران مرکزی واحد ساختمانی مثلث شکلی است که در مرکز ایران قرار دارد و از سمت شمال به ارتفاعات البرز و از شرق به بلوک لوت و در قسمت غربی- جنوب‌شرقی توسط یک منطقه فرو رفته به زون دگرگونی سنجند- سیرجان محدود می‌شود. در این واحد قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگون شده با سن پرکامبرین تا آتشفشان‌های فعال و نیمه‌فعال عهد حاضر مشاهده می‌شود. این واحد قدیمی‌ترین خرده قاره در ایران است که رخدادهای زمین‌شناسی گوناگونی را تجربه کرده است (درویش‌زاده و محمدی، ۱۳۸۶).

بر اساس مدل آشکارساز تغییرات اقلیمی (IRIMO Climate) که توسط سازمان هواشناسی کشور ارائه شده است؛ محدوده مطالعاتی دارای اقلیم خشک و فراخشک است و دارای متوسط بارش بین ۱۲۹ تا ۱۸۸ میلی‌متر و متوسط بلند مدت سالانه دما بین ۱۴/۴ تا ۲۰/۵ درجه سانتیگراد بر اساس داده‌های بلند مدت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه است (اداره تحقیقات هواشناسی کاربردی اصفهان، ۱۳۹۹). خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی ۱- خاک دشت‌ها و دره‌ها شامل خاک‌های باتلاقی شور در شمال کاشان، شمال شرق منطقه، حوالی اردستان بویژه دق سرخ و شمال شرق محدوده مطالعاتی، تپه‌های شنی در شمال شرق، شرق و جنوب شرق کاشان، ۲- خاک فلات‌ها شامل خاک‌های سیروزم در محدوده نطنز و اردستان، برخوار و میمه و شرق، شمال شرق و جنوب منطقه مورد بررسی، خاک‌های سیروزم توام با خاک‌های ریگوسل در شرق و شمال شرقی کاشان و به صورت محدود در جنوب قلمرو مورد بررسی، خاک‌های بیابانی و سیروزم توام با خاک‌های شور در شمال اردستان، ۳- خاک‌های تپه ماهور و کوهستانی شامل لیتوسل آهکی در ناحیه خاک‌های بیابانی و سیروزم در غرب کاشان، شمال و جنوب برخوار و میمه، جنوب نطنز و جنوب اردستان، لیتوسل آهکی متشکل از مارن‌های آهکی و گچی در ناحیه خاک‌های بیابانی و سیروزم در شمال دق سرخ، جنوب شرقی اردستان و غرب کاشان را در بر می‌گیرد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

### روش تحقیق

در این بخش به توضیحاتی در مورد داده‌های مورد استفاده و روش تهیه، آماده‌سازی و به کارگیری داده‌ها در جهت اهداف پژوهشی پرداخته می‌شود. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به طوری کلی شامل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های توپوگرافیکی زمین است که در ادامه با تفصیل بیشتر به آنها پرداخته می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای پوشش دهنده منطقه از سایت <https://glovis.usgs.gov> مربوط به سازمان زمین‌شناسی آمریکا دریافت شد. این تصاویر در ۴ سین مربوط به ماه‌های گرم سال از اول ژوئن تا آخر آگوست (معادل اوایل خرداد تا اوایل شهریور) می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ در هر چهار سین مربوط به دوره زمانی ۱۱ خرداد تا ۹ شهریور با دوره‌های زمانی ۱۶ روزه دانلود گردید (جدول ۱). تمامی تصاویری که به لحاظ پوشش ابر و شرایط جوی در وضعیت مطلوب قرار داشت، با یکدیگر با استفاده از اپراتور میانگین، تلفیق گردید و به ازای هر سال یک تصویر شاخص در نظر گرفته شد. مجموع کل تصاویر لندست مورد بررسی، شامل ۲۰۰ تصویر در ۲۷ ماه، مربوط به ۹ سال شاخص در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ در ۴ سین است که اطلاعات مربوطه در جدول ۱ نشان داده شده است. سازمان اکتشافات فضایی ژاپن، مجموعه داده مدل رقومی سطحی (DSM) را منتشر نمود که دارای قدرت تفکیک مکانی تقریباً ۳۰ متری است. این مجموعه داده AW3D30 در پژوهش‌های علمی و آموزش و طراحی سرویس‌های جدید اطلاعات مکانی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد (تاکاکو و همکاران، ۲۰۱۴). این مجموعه داده، مدل رقومی سطحی (DSM) با قدرت تفکیک افقی تقریباً ۳۰ متر (در اصل ۱ ثانیه قوسی) می‌باشد که توسط ابزار سنجش از دوری پانکروماتیک برای تصویرسازی استریو به دست آمده است. PRISM یک سنسور نوری است که بر روی ماهواره پیشرفته مشاهده زمین (ALOS)



قرار گرفته است. آخرین ورژن ۳/۱ است. مدیریت و آماده‌سازی پایگاه داده بر اساس زبان اسکریپت نویسی پایتون انجام شد. داده‌های خام با فرمت tif به ASCII تبدیل گردید و پردازش گردید.

جدول ۱: تاریخ تصاویر ماهواره لندست مورد استفاده

| ماهواره   | سنجنده               | سال میلادی | شماره تصویر                          |
|-----------|----------------------|------------|--------------------------------------|
| Landsat 5 | Thematic Mapper (TM) | ۱۹۸۷       | ۱۶۳۰۳۶<br>۱۶۳۰۳۷<br>۱۶۴۰۳۶<br>۱۶۴۰۳۷ |
|           |                      | ۱۹۹۱       |                                      |
|           |                      | ۱۹۹۵       |                                      |
|           |                      | ۱۹۹۹       |                                      |
|           |                      | ۲۰۰۲       |                                      |
|           |                      | ۲۰۰۸       |                                      |
| Landsat ۸ | OLI-TIRS             | ۲۰۱۳       | ۱۶۴۰۳۷                               |
|           |                      | ۲۰۱۶       |                                      |
|           |                      | ۲۰۲۰       |                                      |

سپس تصویری که به لحاظ کیفی و شرایط اتمسفری همچون غبار آلودگی و ابرناکی شدید، نامناسب بودند از روند کار کنار گذاشته شد. در مرحله بعد، تصحیحات اتمسفری و هندسی بررسی و در صورت نیاز اعمال گردید و سپس ارزش رقومی یا DN تصاویر به معادل تشعشعی یا Radiance تبدیل شده و در ادامه ۴ سین تصویر پوشش دهنده منطقه مطالعاتی، با یکدیگر موزائیک و سپس ترکیب باند گردید. بر اساس لایه نهایی به دست آمده، شاخص‌های مورد نظر محاسبه و نقشه‌های مربوطه بر این اساس ترسیم گردید. الگوی تغییرات و پراکنش فضایی شاخص‌های شوری در طبقات مختلف ارتفاعی (شکل ۳) مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی با گام‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری به کمک الگوی پردازش رستری سلول به سلول انجام گرفت. لایه شیب از مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از الگوریتم برآورد شیب هورن تهیه شد و سپس در گام‌های ۱ درجه‌ای تغییرات شاخص‌های شوری منتخب بررسی گردید. با استفاده از شاخص توپوگرافیک TPI که از مدل رقومی ارتفاعی به دست می‌آید، واحدهای لندفرمی شامل کلاس دشت‌های هموار، دشت‌سر انتهایی، دشت‌سر میانی، دشت‌سر بالایی و کلاس برآمدگی و کوهها و ارتفاعات بر اساس آستانه‌های نظارت شده و کنترل کارشناسی و تفسیر بصری، شناسایی و تفکیک گردید.

بر اساس پنجره متحرکی با ابعاد ۳ در ۳ پیکسل (شکل ۲)، و به کمک الگوریتم شیب ارائه شده توسط هورن، نقشه شیب استخراج شد (شکل ۴). رابطه (۱) و (۲) شیب را در جهت ستونی و سطری با روش مطرح شده توسط هورن محاسبه می‌کند (هورن، ۱۹۸۱).

|                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| Z <sub>5</sub> | Z <sub>2</sub> | Z <sub>6</sub> |
| Z <sub>1</sub> | Z <sub>0</sub> | Z <sub>3</sub> |
| Z <sub>8</sub> | Z <sub>4</sub> | Z <sub>7</sub> |

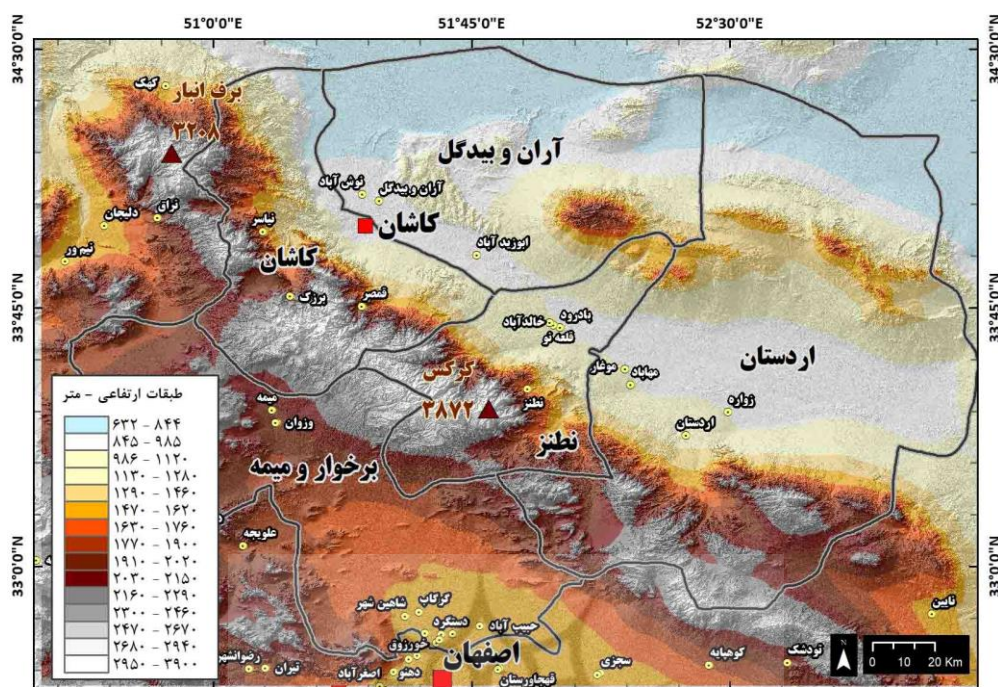
شکل ۲: پنجره متحرک ۳ در ۳ پیکسلی برای محاسبه شیب در ساختار رستری (مدل رقومی ارتفاعی)

$$Slope_{we} = \frac{(Z_7 + 2Z_3 + Z_6) - (Z_8 + 2Z_1 + Z_5)}{8 \times d} \quad \text{رابطه (۱)}$$

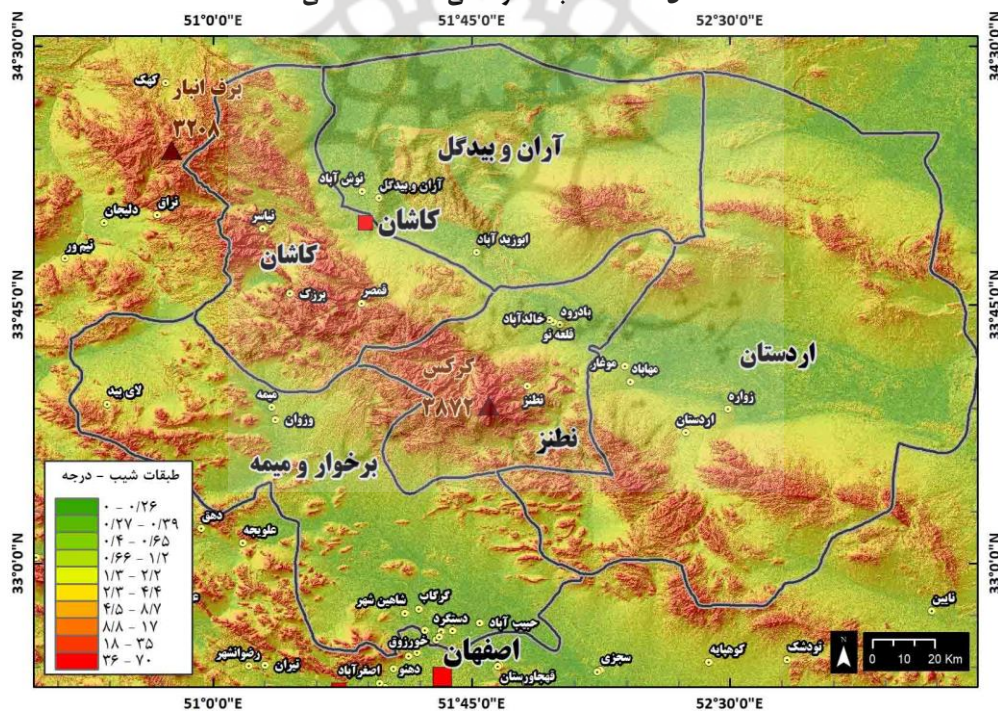
$$Slope_{sn} = \frac{(Z_6 + 2Z_2 + Z_5) - (Z_7 + 2Z_4 + Z_8)}{8 \times d} \quad \text{رابطه (۲)}$$

بعد از محاسبه شیب در جهت سطری و ستونی، شیب کلی با استفاده از رابطه (۳) برآورد گردید.

$$Slope = \tan \alpha = \sqrt{Slope_{row}^2 + Slope_{column}^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$



شکل ۳: نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مطالعاتی



شکل ۴: نقشه شیب منطقه مطالعاتی

شاخص‌های شوری منتخب در ارتباط با مولفه‌های توپوگرافیکی ارتفاع و شیب و همچنین در واحدهای لندفرمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و الگوی تغییرات، روند و توزیع جغرافیایی هر یک از شاخص‌های شوری منتخب در محدوده مطالعاتی، محاسبه و تحلیل و توجیه گردید. به منظور پیش‌بینی تغییرات شاخص‌های شوری از مدل رگرسیون خطی مکانی برای بازسازی شرایط شوری سال ۲۰۳۰ استفاده شد.

واکاوی رگرسیونی (وایازی) یک شگرد آماری- ریاضی برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیر وابسته و متغیر مستقل با هدف پیش‌بینی متغیر وابسته از روی متغیر و یا متغیرهای مستقل است. یکی از مدل‌های آماری مناسب جهت پیش‌بینی مخاطرات طبیعی استفاده از مدل‌های رگرسیونی است. این مدل‌ها در میان مدل‌های داده محور در زمره مهمترین مدل‌ها بشمار می‌روند. مدل‌های رگرسیون از مدل‌های خطی تا غیرخطی و پارامتری تا ناپارامتری را شامل می‌شوند. مدل‌های مختلفی برای برآورد نقطه‌ای و فاصله‌ای متغیرهای وابسته با استفاده از روش‌های رگرسیون مختلف ارائه شده است. مدل رگرسیون خطی ساده یک روش ریاضی برای بیان رابطه آماری ساده بین دو متغیر همبسته  $x$  و  $y$  است. خط رگرسیون خطی است که با بهترین برازش از میان مجموعه نقاط پراکنش نگار می‌گذرد. معادله برازش خط به صورت زیر است:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

$\hat{y}$  مختصات خط به ازای  $x$ های مختلف است. قسمت  $a + bx_i$  مولفه قطعی در این مدل است. در این معادله  $a$  عرض از مبدا است که نشانگر نقطه آغاز ارتباط دو متغیر و در پراکنش نگار محل قطع شدن محور  $y$  به وسیله خط برازش است.  $b$  شیب خط حاصل از معادله و تانژانت زاویه خط وایازی و محور افقی ( $x$ ) است. این مقدار گویای میزان تغییر در متغیر  $y$  به ازای یک واحد تغییر در متغیر  $x$  است. شیب مثبت ( $b > 0$ ) نشانگر رابطه مستقیم دو متغیر ( $x$  و  $y$ ) است. شیب منفی ( $b < 0$ ) بیانگر رابطه معکوس دو متغیر است.  $b = 0$  نیز نشان می‌دهد  $y$  به تغییرات  $x$  پاسخ نمی‌دهد. برای برآورد پارامترهای  $a$  و  $b$  می‌توان از روش‌های کمترین مربعات خطا، کمترین قدرمطلق انحراف‌ها و روش‌های ناپارامتری بهره گرفت. روش کمترین مربعات خطا، خطی را بر داده‌ها برازش می‌دهد که مجموع مربع خطاها را به حداقل ممکن می‌رساند. یکی از روش‌های برآورد شیب خط عبارت است از:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

با داشتن شیب خط، می‌توان عرض از مبدا را نیز از طریق رابطه (۶) بدست آورد:

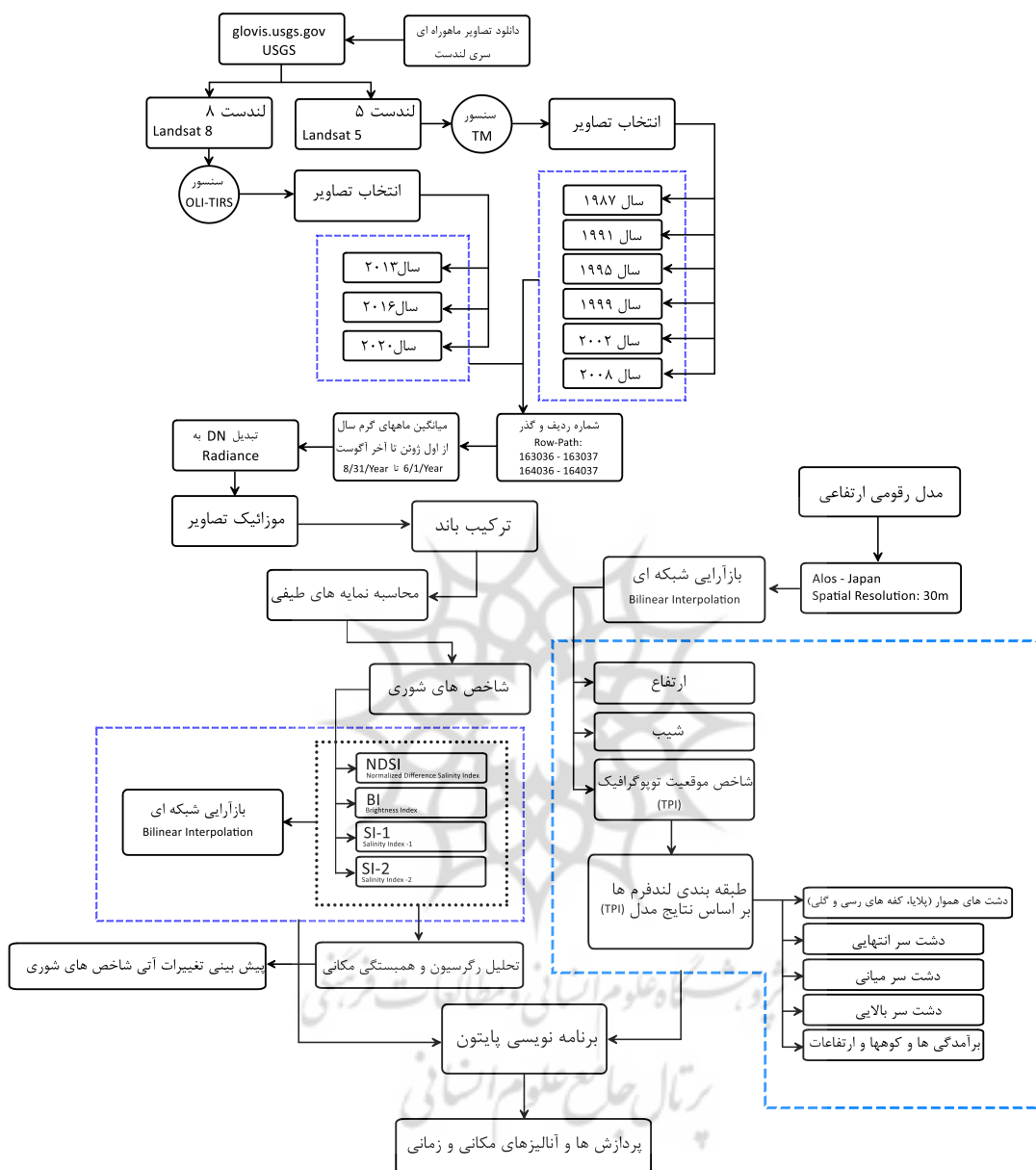
$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{رابطه (۶)}$$

شکل ۵ فلوجارت مراحل مختلف پژوهش را نشان می‌دهد. در ادامه به روش محاسبه شاخص‌های مرتبط با شوری (جدول ۲) بر اساس تصاویر ماهواره‌ای پرداخته می‌شود. شاخص‌های NDSI<sup>۱</sup>، BI<sup>۲</sup>، SI-1 و SI-2 از بین شاخص‌های نماینده شوری، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>1</sup>- Normalized Difference Salinity Index

<sup>2</sup>- Brightness Index





شکل ۵: فلوجارت روش تحقیق

جدول ۲: شاخص‌های شوری مورد استفاده در پژوهش

| شاخص‌های شوری              | علامت اختصافی | معادله                               | منبع                   |
|----------------------------|---------------|--------------------------------------|------------------------|
| شاخص شوری تفاضلی نرمال شده | NDSI          | $NDSI = \frac{Red - NIR}{Red + NIR}$ | (Khan et al., 2005)    |
| شاخص روشنایی               | BI            | $BI = \sqrt{R^2 + NIR^2}$            | (Khan et al., 2005)    |
| شاخص شوری ۱                | SI1           | $SI1 = \sqrt{B + R}$                 | (Douaoui et al., 2006) |
| شاخص شوری ۲                | SI2           | $SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$     | (Douaoui et al., 2006) |

بر این اساس در روابط فوق NIR باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ در لندست ۵ و باند ۵ در لندست ۸)، RED باند قرمز (باند ۳ در لندست ۵ و باند ۴ در لندست ۸)، B باند آبی (باند ۱ در لندست ۵ و باند ۲ در لندست ۸)، G باند سبز (باند ۲ در لندست ۵ و باند ۳ در لندست ۸ است).

### شاخص توپوگرافی TPI

از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (گوئیسن و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹) که بعدها توسط ویس<sup>۲</sup> و جنیس<sup>۳</sup> (۲۰۰۱، ۲۰۰۶) توسعه داده شد، به عنوان روش مبنایی استفاده شد. شاخص موقعیت توپوگرافیک ارتفاع هر سلول با متوسط هشت سلول مجاور را در مدل رقومی ارتفاعی مقایسه نموده و از این طریق TPI را نمایه‌سازی می‌نماید. مقادیر مثبت TPI نماینده نواحی برجسته و برآمده‌ای است که از ارتفاع متوسط پیرامونش مرتفع‌تر است و برعکس مقادیر منفی نماینده چاله‌ها، دره‌ها، فرورفتگی‌ها یا شیارهایی می‌شود که به نسبت متوسط ارتفاع اطراف پست‌تر می‌باشد. مقادیر نزدیک به صفر نماینده نواحی مسطح می‌باشد (رئو و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳). شاخص موقعیت توپوگرافیک در اصل تفاضل بین ارتفاع در نقطه مرکزی را با میانگین پیکسل‌های مجاور در یک تحلیل مجاورت رستری است که با تعریف یک شعاع مجاورت می‌توان درجه جنرالیزاسیون را بر روی آن اعمال کرد (گالنت ویلسون<sup>۵</sup>، ۲۰۰۰؛ ویس<sup>۶</sup>، ۲۰۰۱). روابط شماره ۷ و ۸ روش محاسبه TPI را نشان می‌دهد. شاخص موقعیت توپوگرافیک بر اساس تکنیک آنالیز پنجره متحرک به دست آمد. برای محاسبه شاخص TPI از روابط زیر استفاده شد:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n_R} \sum_{i \in R} Z_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{TPI} = Z_0 - \bar{Z} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این پژوهش شاخص موقعیت توپوگرافیک به شرح فوق محاسبه و سپس بین ۰ تا ۱۰۰ نرمال‌سازی گردید؛ به طوری که ۱۰۰ نماینده قله و برجستگیها و ۰ نماینده چاله‌ها و فرورفتگی‌ها باشد. بر اساس روش بازآرایی شبکه ای<sup>۷</sup> میانمایی دوسویه<sup>۸</sup>، شاخص‌های شوری مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای و مولفه‌های توپوگرافیکی مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی با یکدیگر به لحاظ هندسه رستری تطبیق گردید.

### بحث و یافته‌ها

بر اساس آستانه‌های نظارت شده، واحدهای فرمی بر پایه TPI تعیین و نقشه لندفرم‌های زمین تهیه و ترسیم گردید. شناسایی و تشخیص واحدهای فرمی اصلی در این پژوهش بر اساس نتایج شاخص TPI انجام گرفته است بدین صورت که بر اساس طبقه‌بندی نظارت شده با آستانه‌های کنترل زمینی به دست آمده‌اند. برای کنترل نتایج و آستانه‌ای تقسیم‌بندی اراضی به واحدهای فرم شناسی از منابع داده مدل رقومی ارتفاعی مانند مدل سایه - روشن، نقشه شیب و نقشه‌های توپوگرافی رقومی بهره گرفته شده است. بررسی لندفرم‌ها نشان داد که ۵ نوع لندفرم مشتمل بر برآمدگی‌ها و کوه‌ها، پایکوها، دشت‌سر بالایی، دشت‌سر میانی، دشت‌سر انتهایی، دشت‌های هموار (پلایا، کفه‌های رسی و گلی) در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص است. پلایاها و کفه‌های رسی منطقه در دو طرف کوهستان اصلی مخصوصاً در مرکز، شمال و شمال شرق تجمع بیشتری داشته و در عین حال در منطقه حبیب آباد برخوار نیز دیده می‌شوند. منطقه مرکزی محدوده مورد بررسی را کوه‌های کرکس فرا گرفته که روندی شمال غربی - جنوب شرقی دارد. شکل (۶) نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی و طبقه‌بندی لندفرم‌های زمین بر پایه TPI را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود طبقات لندفرمی از کلاس دشت‌های هموار (پلایا، کفه‌های گلی و رسی) به سمت کلاس برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات مقدار عددی شاخص موقعیت توپوگرافیک یا TPI افزایش می‌یابد. شاخص‌های نماینده شوری در این پژوهش شامل

<sup>1</sup> - Guisan et al

<sup>2</sup> - Weiss

<sup>3</sup> - Jenness

<sup>4</sup> - Reu et.al

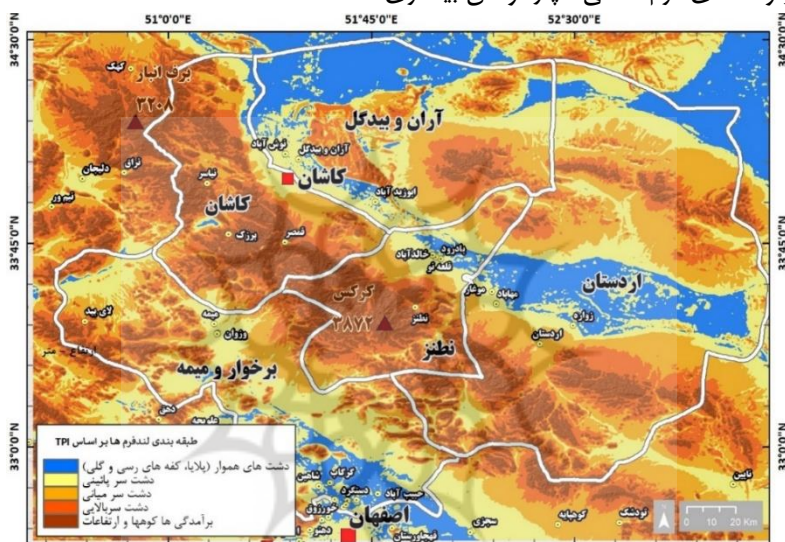
<sup>5</sup> - Gallant and Wilson

<sup>6</sup> - Weiss

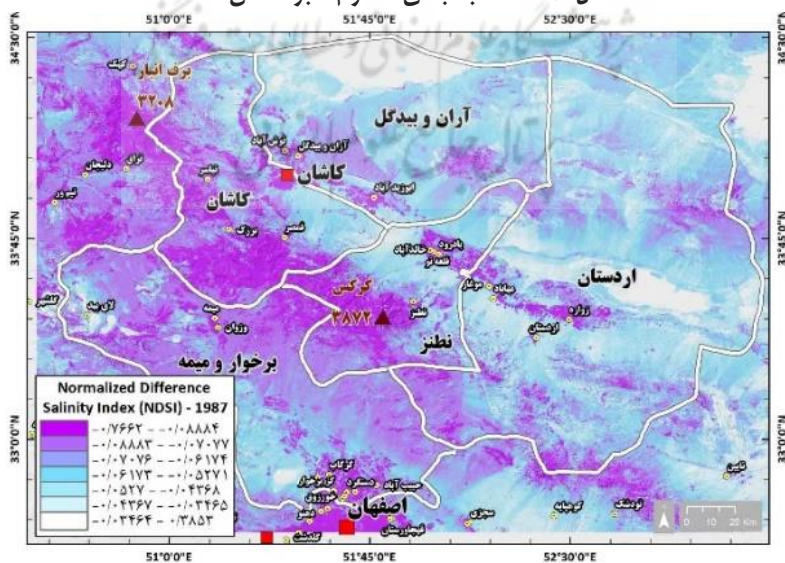
<sup>7</sup> - Resampling

<sup>8</sup> - Bilinear Interpolation

شاخص‌های NDSI، BI، SI1 و SI2 بود که برای متوسط ماههای گرم سال در سال‌های آماری مورد بررسی محاسبه شد که به عنوان نمونه سال‌های ۱۹۸۷، ۱۹۹۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۰ در اشکال (۷) تا (۲۲) نشان داده است. شکل ۷-۱۰ شاخص شوری NDSI را برای سال‌های منتخب در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. تغییرات شاخص شوری NDSI در سال‌های منتخب در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و شرقی مقادیر بالاتری داشته و نواحی جنوب غربی و جنوبی و به طور کلی ارتفاعات کرکس دارای مقادیر کمتری می‌باشد. بر این اساس می‌توان گفت که روند تغییرات شاخص شوری از مناطق کوهستانی به سمت نقاط پست افزایش می‌یابد. شاخص NDSI که به نوعی معکوس شده شاخص NDVI می‌باشد، دارای تاثیر پذیری بالایی از پوشش گیاهی می‌باشد. به دلیل تاثیر پذیری بالا از پوشش گیاهی خصوصا در انتهای مخروط افکنه‌ها و دشت‌های منتهی به چاله‌ها در محدوده مطالعاتی، روند و ارتباط بین NDSI و ارتفاع در واحدهای فرم‌شناسی دچار نوسان بیشتری شده است.

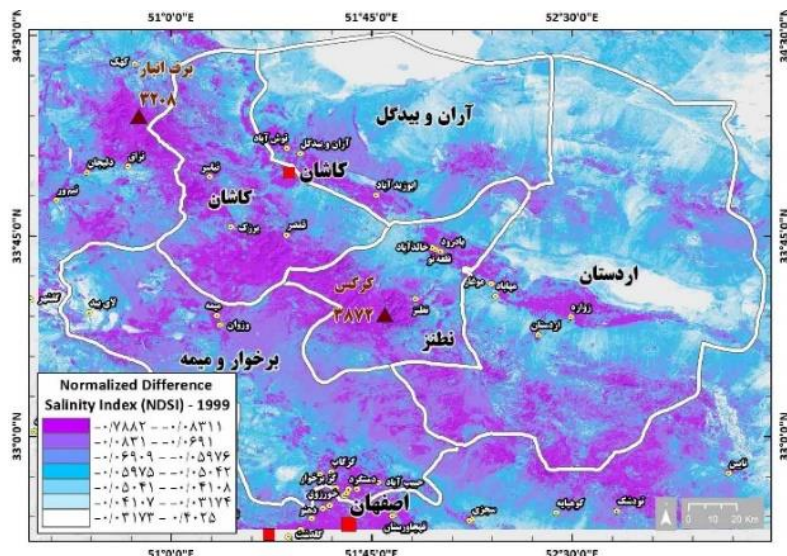


شکل ۶: نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر اساس TPI

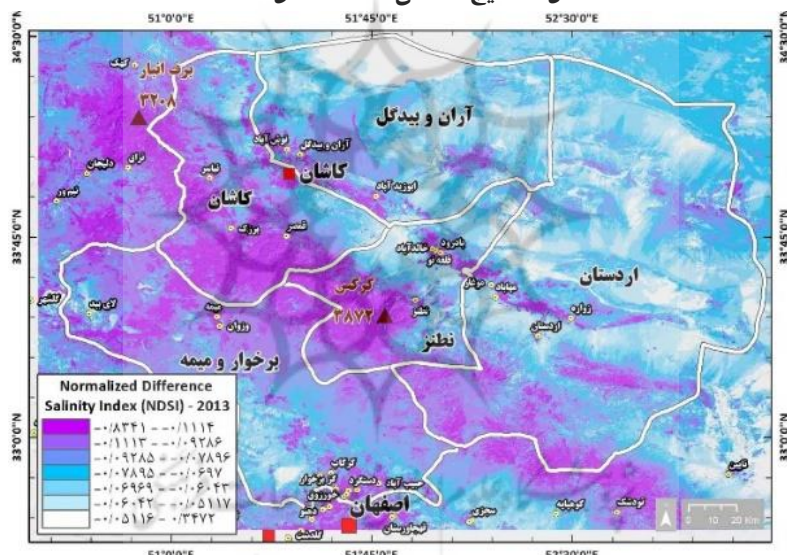


شکل ۷: نتایج شاخص NDSI سال ۱۹۸۷

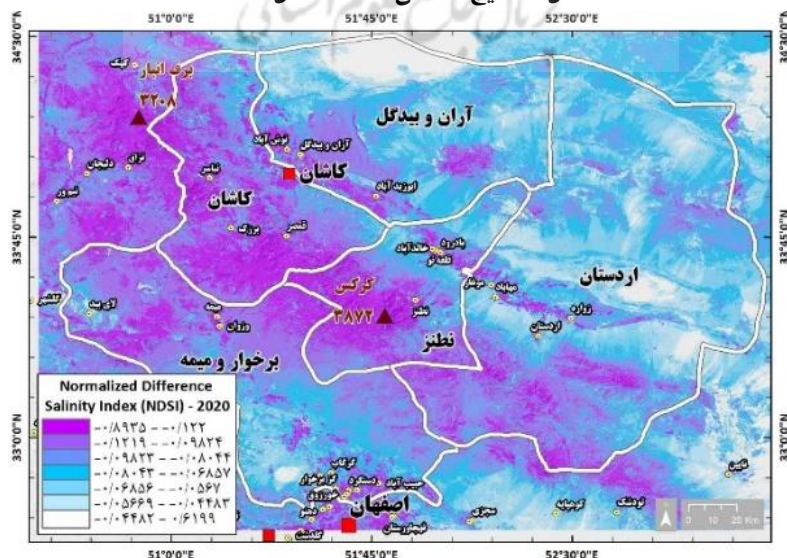




شکل ۸: نتایج شاخص NDSI سال ۱۹۹۹



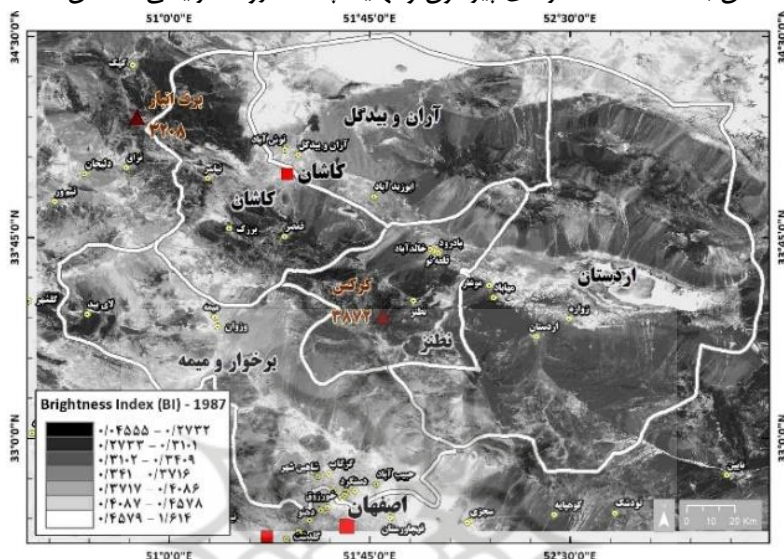
شکل ۹: نتایج شاخص NDSI سال ۲۰۱۳



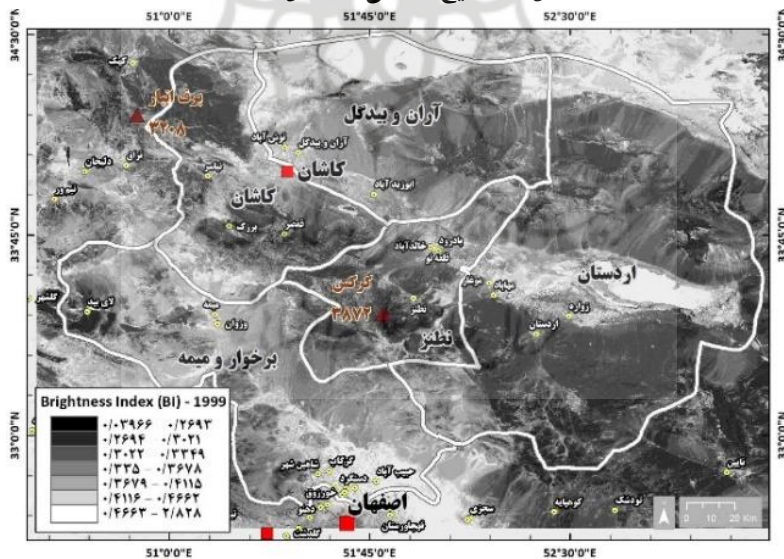
شکل ۱۰: نتایج شاخص NDSI سال ۲۰۲۰



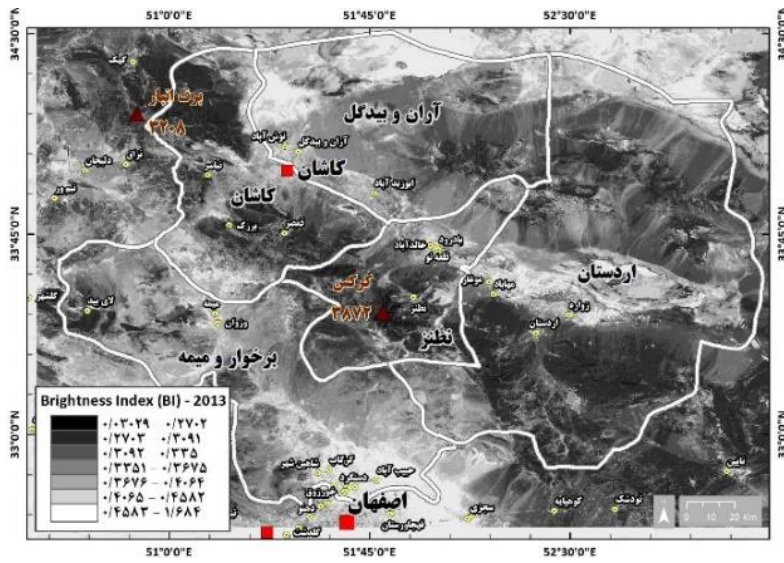
شاخص روشنایی BI در شکل ۱۴-۱۱ برای سال‌های آماری منتخب محاسبه و نشان داده شده است. به طوری که در شکل مشاهده می‌شود، چاله‌های دق سرخ و اردستان، کفه دریاچه نمک و پیرامون و همچنین چاله حبیب آباد - سگری در پیرامون ارتفاعات کرکس دارای مقادیر تابندگی یا روشنایی بالاتر و بخش‌های کوهستانی، به خصوص توده‌های آتشفشانی کرکس دارای مقادیر BI بسیار کمتری هستند. نکته قابل توجه دیگری که در این شکل مشاهده می‌شود آن است که از واحد کوهستان به سمت دشت‌سره‌های پیرامون و نهایتاً چاله‌ها، روند افزایشی شاخص BI مشهود است.



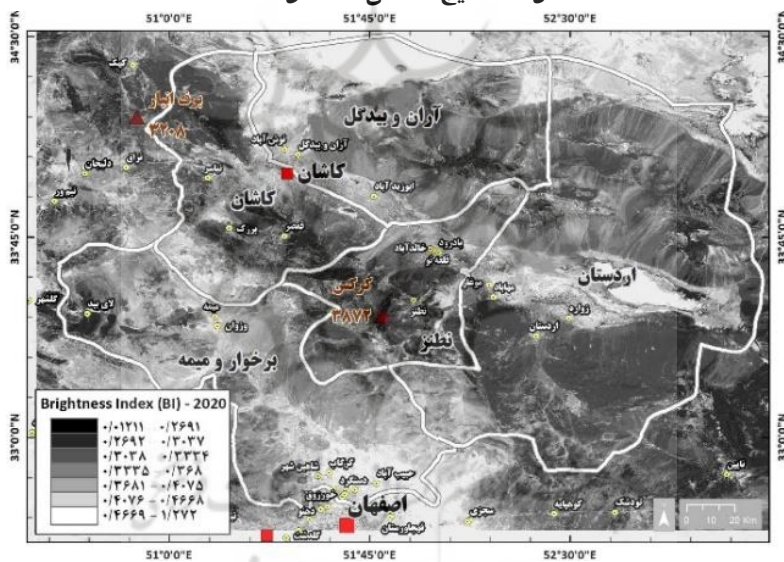
شکل ۱۱: نتایج شاخص BI سال ۱۹۸۷



شکل ۱۲: نتایج شاخص BI سال ۱۹۹۹



شکل ۱۳: نتایج شاخص BI سال ۲۰۱۳

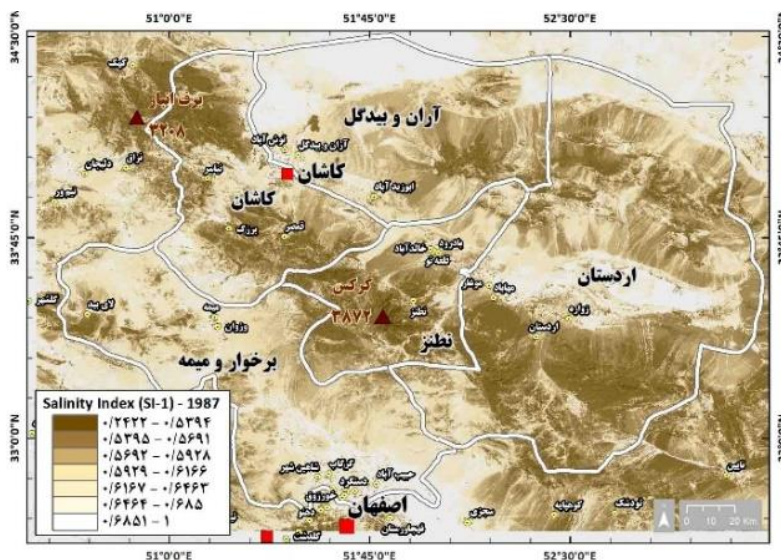


شکل ۱۴: نتایج شاخص BI سال ۲۰۲۰

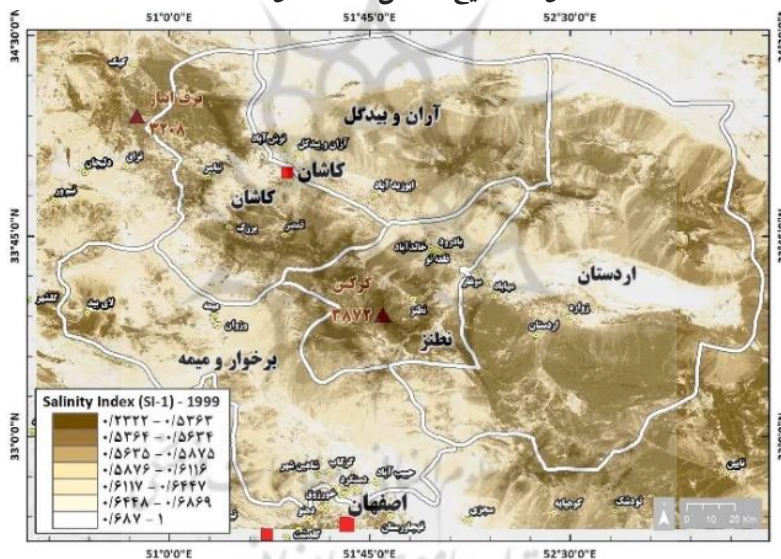
در شکل (۱۵-۱۸) شاخص شوری SI1 برای سال‌های آماری منتخب مورد بررسی برای محدوده مطالعاتی، محاسبه و نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده از این شاخص، نشان می‌دهد که چاله‌های دق - سرخ و اردستان و اراضی کم ارتفاع اطراف کاشان و اراضی کم ارتفاع پیرامون اصفهان، همگی نرخ بالاتری از SI-1 را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل اراضی مرتفع مربوط به واحد کوهستانی کرکس و مارشان دارای نرخ SI-1 بسیار کمتری هستند. اراضی کم شیب و دشت‌سره‌های مجاور در حالتی بینابینی قرار دارند. به لحاظ جغرافیایی نوار جنوبی، مرکزی و شمالی محدوده مطالعاتی مقادیر بالاتری از شاخص شوری SI-1 را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۹-۲۲) شاخص شوری SI-2 در سال‌های آماری منتخب برای منطقه مطالعاتی، محاسبه و ترسیم شده است. به طور کلی الگوی کلی شاخص SI-2 مشابه شاخص SI-1 می‌باشد. انطباق نسبتاً بالایی بین تغییرات شاخص SI-2 با تغییرات ارتفاع و واحدهای لندفرمی منطقه مشاهده می‌شود. در کل اراضی پست و کم ارتفاع و دشت‌های مسطح و کم ارتفاع، دارای نرخ بالاتری از SI-2 به نسبت زمین‌های مرتفع و کوهستانی هستند. معابر رودها و مسیل‌ها نیز نرخ پائین‌تری نشان می‌دهند.

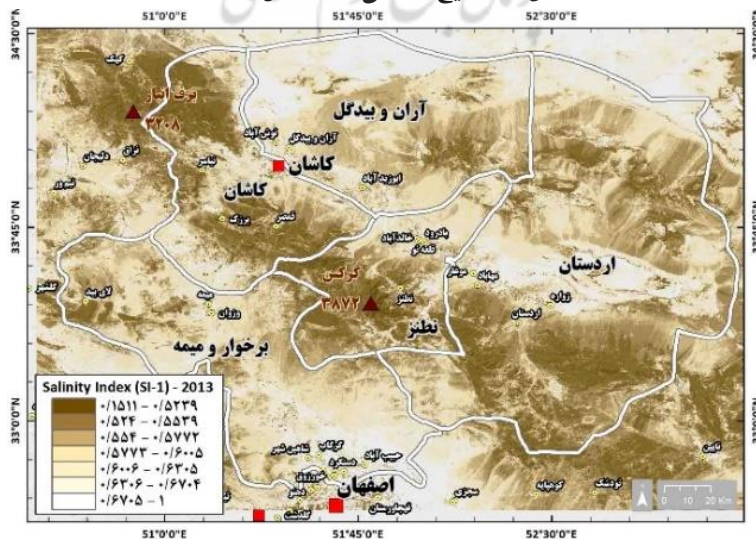




شکل ۱۵: نتایج شاخص SI-1 سال ۱۹۸۷

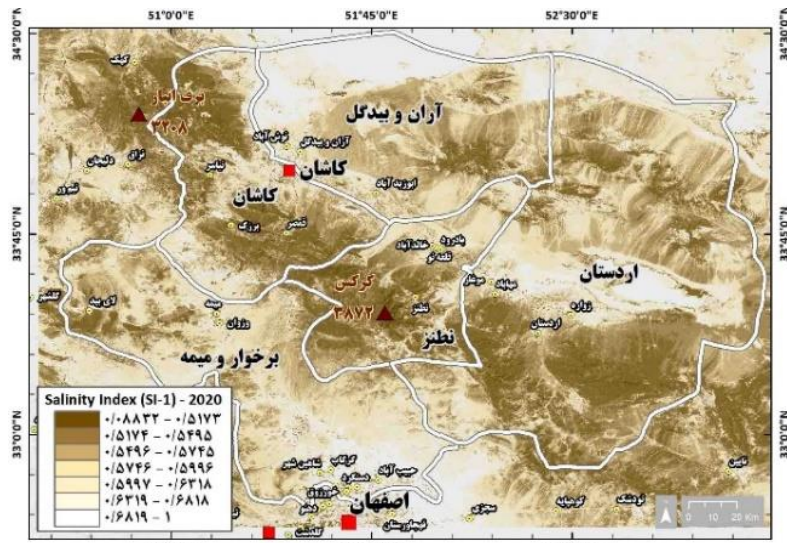


شکل ۱۶: نتایج شاخص SI-1 سال ۱۹۹۹

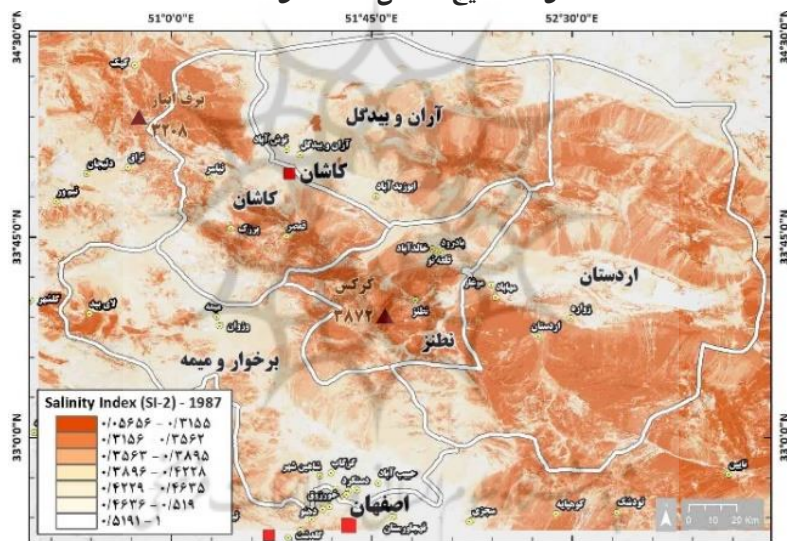


شکل ۱۷: نتایج شاخص SI-1 سال ۲۰۱۳

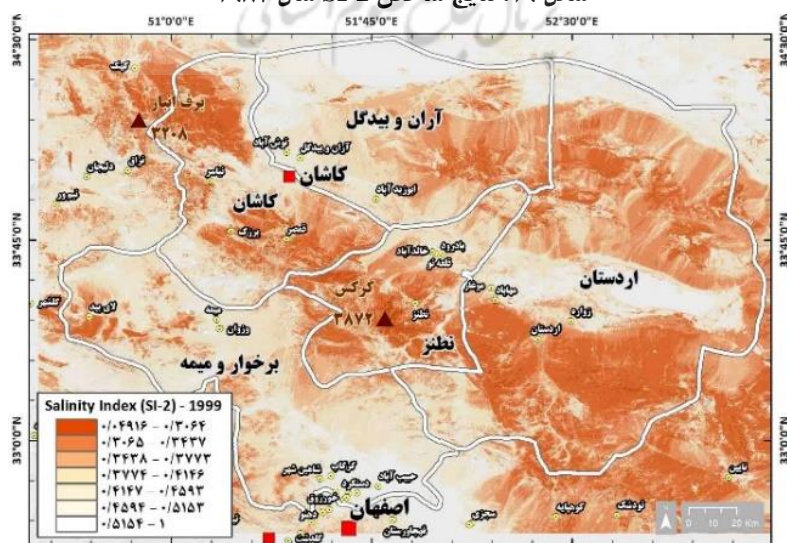




شکل ۱۸: نتایج شاخص SI-1 سال ۲۰۲۰



شکل ۱۹: نتایج شاخص SI-2 سال ۱۹۸۷



شکل ۲۰: نتایج شاخص SI-2 سال ۱۹۹۹



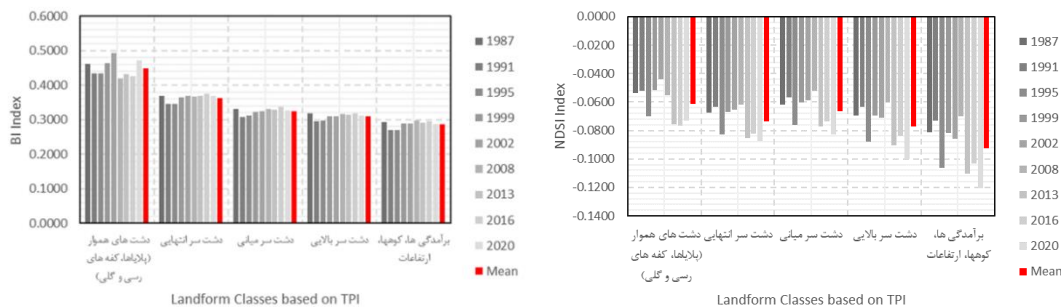


تقریباً در تمامی واحدهای لندفرمی در سال‌های آماری منتخب روند افزایشی شاخص BI از سمت برآمدگی‌ها، کوهها، ارتفاعات تا دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های رسی و گلی) مشاهده می‌شود (جدول ۳ و شکل ۲۳). افزایش شاخص BI یا درخشندگی اراضی می‌تواند به صورت غیرمستقیم تأییدی بر افزایش شوری اراضی باشد و با توجه به رفتار شاخص NDSI می‌تواند افزایش شوری اراضی در محدوده مطالعاتی را تأیید کند. متوسط شاخص شوری NDSI در طبقات لندفرمی در سال‌های آماری مورد بررسی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول شماره ۴: متوسط شاخص Normalized Difference Salinity Index (NDSI) در طبقات لندفرمی

| طبقات لندفرمی بر پایه TPI                  | 1987    | 1991    | 1995    | 1999    | 2002           | 2008           | 2013    | 2016           | 2020           | میانگین |
|--|---------|---------|---------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|---------|
| دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های رسی و گلی) | -0/0534 | -0/0523 | -0/0699 | -0/0515 | <b>-0/0442</b> | -0/0551        | -0/0757 | <b>-0/0765</b> | -0/0731        | -0/0613 |
| دشت سرانتهایی                              | -0/0674 | -0/0635 | -0/0829 | -0/0671 | -0/0655        | <b>-0/0617</b> | -0/0856 | -0/0820        | <b>-0/0875</b> | -0/0737 |
| دشت سر میانی                               | -0/0618 | -0/0565 | -0/0761 | -0/0603 | -0/0587        | <b>-0/0520</b> | -0/0771 | -0/0734        | <b>-0/0826</b> | -0/0665 |
| دشت سر بالایی                              | -0/0695 | -0/0635 | -0/0876 | -0/0695 | -0/0711        | <b>-0/0603</b> | -0/0906 | -0/0839        | <b>-0/1004</b> | -0/0774 |
| برآمدگی‌ها، کوهها، ارتفاعات                | -0/0815 | -0/0732 | -0/1061 | -0/0819 | -0/0857        | <b>-0/0699</b> | -0/1102 | -0/1033        | <b>-0/1207</b> | -0/0925 |
| کمتری ن مقدار                              |         |         |         |         |                |                |         |                |                |         |
| بالاتری ن مقدار                            |         |         |         |         |                |                |         |                |                |         |

شاخص NDSI که به نوعی معکوس شده شاخص NDVI می‌باشد، دارای تأثیرپذیری بالایی از پوشش گیاهی می‌باشد. به دلیل تأثیر پذیری بالا از پوشش گیاهی خصوصاً در انتهای مخروط افکنه‌ها و دشت‌های منتهی به چاله‌ها در محدوده مطالعاتی، روند و همبستگی بین NDSI با ارتفاع و واحدهای لندفرمی دچار نوسان بیشتری شده است. تغییرات شاخص NDSI در طبقات مختلف ارتفاعی در جدول ۴ و شکل ۲۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً در تمامی واحدهای لندفرمی در سال‌های آماری منتخب روند افزایشی شاخص NDSI از سمت واحد برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات به سمت دشت‌های هموار، پلایاها و کفه‌های رسی مشاهده می‌شود و این روند، افزایشی کم و بیش با شیب ملایم داشته است. به طور کلی بالاترین متوسط NDSI در واحد برآمدگی‌ها، کوه‌ها و ارتفاعات مشاهده شد و کمترین مقدار آن در واحد دشت‌های هموار مشاهده گردید. در شکل (۲۳) نمودار نوسانات شاخص‌های شوری NDSI و BI در واحدهای فرمی در سال‌های مورد مطالعه، نشان داده شده است. روند تغییرات NDSI در تمامی واحدهای فرمی و در تمامی سال‌های مطالعاتی کاهش‌ی است (کاهش مقدار NDSI به معنای افزایش میزان شوری است).



شکل شماره ۲۳: تغییرات شاخص BI و NDSI در واحدهای فرمی

در جداول (۵ و ۶) متوسط شاخص شوری SI-1 و SI-2 برای واحدهای لندفرمی در سال‌های آماری منتخب برای محدوده مطالعاتی، محاسبه شده است.

جدول شماره ۵: متوسط شاخص Salinity Index-1 (SI-1) در واحدهای لندفرمی

| طبقات لندفرمی بر پایه TPI                  | 1987   | 1991   | 1995          | 1999   | 2002          | 2008          | 2013   | 2016          | 2020   | میانگین |
|--|--------|--------|---------------|--------|---------------|---------------|--------|---------------|--------|---------|
| دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های رسی و گلی) | 0/7167 | 0/6929 | 0/6744        | 0/7062 | <b>0/7323</b> | 0/6587        | 0/6570 | <b>0/6482</b> | 0/6886 | 0/6861  |
| دشت‌سر انتهایی                             | 0/6156 | 0/5952 | <b>0/5917</b> | 0/6115 | 0/6146        | <b>0/6166</b> | 0/6025 | 0/6074        | 0/6009 | 0/6062  |
| دشت‌سر میانی                               | 0/5865 | 0/5679 | <b>0/5669</b> | 0/5800 | 0/5832        | <b>0/5934</b> | 0/5755 | 0/5826        | 0/5703 | 0/5785  |
| دشت‌سر بالایی                              | 0/5710 | 0/5517 | <b>0/5479</b> | 0/5646 | 0/5642        | <b>0/5757</b> | 0/5555 | 0/5611        | 0/5489 | 0/5601  |
| برآمدگی‌ها، کوهها، ارتفاعات                | 0/5448 | 0/5250 | <b>0/5164</b> | 0/5407 | 0/5385        | <b>0/5534</b> | 0/5284 | 0/5321        | 0/5195 | 0/5332  |
| کمترین مقدار                               |        |        |               |        |               |               |        |               |        |         |
| بالاترین مقدار                             |        |        |               |        |               |               |        |               |        |         |

جدول شماره ۶: متوسط شاخص Salinity Index-2 (SI-2) در واحدهای لندفرمی

| طبقات لندفرمی بر پایه TPI                  | 1987          | 1991   | 1995   | 1999   | 2002          | 2008          | 2013   | 2016   | 2020          | میانگین |
|--|---------------|--------|--------|--------|---------------|---------------|--------|--------|---------------|---------|
| دشت‌های هموار (پلایاها، کفه‌های رسی و گلی) | 0/5305        | 0/4986 | 0/4907 | 0/5304 | <b>0/5666</b> | 0/4779        | 0/4555 | 0/4466 | 0/5020        | 0/4999  |
| دشت‌سر انتهایی                             | <b>0/4197</b> | 0/3923 | 0/3895 | 0/4142 | 0/4184        | 0/4181        | 0/3829 | 0/3904 | <b>0/3822</b> | 0/4009  |
| دشت‌سر میانی                               | 0/3767        | 0/3520 | 0/3516 | 0/3670 | 0/3711        | <b>0/3795</b> | 0/3465 | 0/3555 | <b>0/3410</b> | 0/3601  |
| دشت‌سر بالایی                              | <b>0/3616</b> | 0/3359 | 0/3340 | 0/3526 | 0/3533        | 0/3615        | 0/3252 | 0/3325 | <b>0/3184</b> | 0/3417  |
| برآمدگی‌ها، کوهها، ارتفاعات                | 0/3345        | 0/3080 | 0/3039 | 0/3284 | 0/3275        | <b>0/3381</b> | 0/2965 | 0/3015 | <b>0/2875</b> | 0/3140  |
| کمترین مقدار                               |               |        |        |        |               |               |        |        |               |         |
| بالاترین مقدار                             |               |        |        |        |               |               |        |        |               |         |

آنالیز شاخص‌های شوری SI1,2 در واحدهای لندفرمی در دوره آماری در نقشه لندفرم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در جدول ۵ و ۶ و شکل ۲۴ نشان داده شده است. تقریباً در تمامی واحدهای لندفرمی در سال‌های آماری منتخب روند افزایشی شاخص SI1,2 از سمت واحد برآمدگی‌ها، کوهها و ارتفاعات به سمت کفه‌ها، و دشت‌های همواره و پلایا مشاهده می‌شود.



شکل شماره ۲۴: تغییرات شاخص SI-2 و SI-1 در واحدهای فرمی

### آنالیز شاخص‌های شوری در طبقات ارتفاعی در دوره آماری مورد بررسی

در گام دوم، میزان و نوسان شاخص‌های شوری در طبقات ارتفاعی، در سال‌های آماری منتخب در منطقه مطالعاتی، مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۷) نتیجه آنالیزهای مربوط به نوسانات شاخص BI در طبقات مختلف ارتفاعی با گام‌های ۲۵۰ متری در سال‌های آماری منتخب نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، متوسط شاخص شوری BI در طبقات ارتفاعی مختلف در تمامی سال‌های آماری مورد بررسی از ارتفاع کم به زیاد، روند کاهشی نشان می‌دهد. بدین معنا که ارتفاعات به نسبت زمین‌های کم ارتفاع درجه روشنایی پائین‌تری نشان می‌دهند.

جدول شماره ۷: متوسط شاخص Brightness Index (BI) در طبقات مختلف ارتفاعی

| حد پائین ارتفاع | حد بالای ارتفاع | 1987  | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 650             | 900             | 0/429 | 0/413 | 0/398 | 0/416 | 0/456 | 0/396 | 0/399 | 0/406 | 0/433 | 0/416   |
| 900             | 1150            | 0/349 | 0/327 | 0/329 | 0/351 | 0/351 | 0/344 | 0/351 | 0/345 | 0/350 | 0/344   |
| 1150            | 1400            | 0/306 | 0/287 | 0/291 | 0/297 | 0/301 | 0/311 | 0/305 | 0/311 | 0/301 | 0/301   |
| 1400            | 1650            | 0/352 | 0/329 | 0/340 | 0/349 | 0/352 | 0/359 | 0/356 | 0/367 | 0/357 | 0/351   |
| 1650            | 1900            | 0/334 | 0/308 | 0/311 | 0/330 | 0/329 | 0/339 | 0/331 | 0/339 | 0/330 | 0/328   |
| 1900            | 2150            | 0/342 | 0/312 | 0/316 | 0/333 | 0/332 | 0/336 | 0/332 | 0/341 | 0/333 | 0/331   |
| 2150            | 2400            | 0/327 | 0/298 | 0/302 | 0/319 | 0/318 | 0/321 | 0/320 | 0/326 | 0/319 | 0/317   |
| 2400            | 2650            | 0/312 | 0/284 | 0/287 | 0/304 | 0/302 | 0/306 | 0/305 | 0/311 | 0/302 | 0/301   |
| 2650            | 2900            | 0/294 | 0/266 | 0/270 | 0/289 | 0/285 | 0/293 | 0/290 | 0/297 | 0/285 | 0/285   |
| 2900            | 3150            | 0/293 | 0/262 | 0/268 | 0/286 | 0/284 | 0/293 | 0/289 | 0/292 | 0/282 | 0/283   |
| 3150            | 3400            | 0/274 | 0/244 | 0/248 | 0/266 | 0/267 | 0/272 | 0/271 | 0/269 | 0/263 | 0/264   |
| 3400            | 3650            | 0/230 | 0/206 | 0/207 | 0/223 | 0/237 | 0/243 | 0/227 | 0/227 | 0/220 | 0/225   |
| 3650            | 3900            | 0/229 | 0/205 | 0/207 | 0/222 | 0/241 | 0/250 | 0/224 | 0/225 | 0/220 | 0/225   |

در جدول (۸) تغییرات شاخص NDSI در طبقات ارتفاعی منطقه مطالعاتی در سال‌های آماری مورد بررسی، محاسبه و نمایش داده شده است. مرور نتایج به دست آمده از جدول (۸) نشان می‌دهد که به طور کلی در تمامی سال‌های آماری منتخب، افزایش ارتفاع با کاهش شاخص NDSI همراه است. بدین معنا که ارتفاعات به نسبت اراضی کم ارتفاع و چاله‌ها، نرخ NDSI کمتری دارند. لازم به ذکر است که نرخ کمتر NDSI با معنای میزان شوری بالاتر می‌باشد. در نموداری که در شکل (۲۵) نشان داده شده است، در تمامی سال‌های آماری مورد بررسی، افزایش ارتفاع با کاهش شاخص BI همراه بوده است. همچنین افزایش ارتفاع با کاهش شاخص NDSI نیز همساز است.

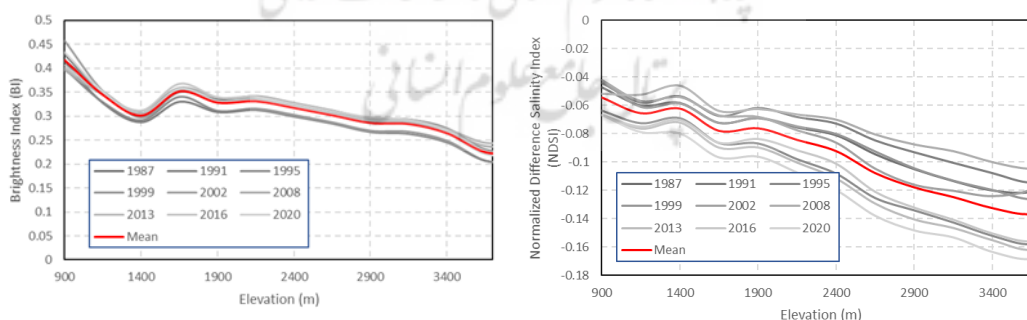


جدول شماره ۸: متوسط شاخص Normalized Difference Salinity Index (NDSI) در طبقات مختلف ارتفاعی

| حد پائین ارتفاع | حد بالای ارتفاع | 1987  | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 650             | 900             | -0/04 | -0/04 | -0/06 | -0/04 | -0/04 | -0/05 | -0/06 | -0/06 | -0/06 | -0/05   |
| 900             | 1150            | -0/06 | -0/05 | -0/07 | -0/06 | -0/05 | -0/05 | -0/07 | -0/07 | -0/07 | -0/06   |
| 1150            | 1400            | -0/05 | -0/05 | -0/06 | -0/05 | -0/05 | -0/04 | -0/07 | -0/07 | -0/07 | -0/06   |
| 1400            | 1650            | -0/07 | -0/06 | -0/08 | -0/07 | -0/06 | -0/06 | -0/08 | -0/08 | -0/09 | -0/07   |
| 1650            | 1900            | -0/06 | -0/06 | -0/08 | -0/06 | -0/06 | -0/06 | -0/08 | -0/08 | -0/09 | -0/07   |
| 1900            | 2150            | -0/07 | -0/06 | -0/09 | -0/07 | -0/07 | -0/06 | -0/10 | -0/09 | -0/10 | -0/08   |
| 2150            | 2400            | -0/08 | -0/07 | -0/10 | -0/08 | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/10 | -0/11 | -0/09   |
| 2400            | 2650            | -0/09 | -0/08 | -0/12 | -0/09 | -0/10 | -0/08 | -0/12 | -0/12 | -0/13 | -0/10   |
| 2650            | 2900            | -0/10 | -0/09 | -0/13 | -0/10 | -0/11 | -0/08 | -0/14 | -0/13 | -0/14 | -0/11   |
| 2900            | 3150            | -0/11 | -0/10 | -0/14 | -0/11 | -0/12 | -0/09 | -0/14 | -0/14 | -0/15 | -0/12   |
| 3150            | 3400            | -0/11 | -0/10 | -0/15 | -0/11 | -0/12 | -0/10 | -0/15 | -0/15 | -0/16 | -0/13   |
| 3400            | 3650            | -0/12 | -0/11 | -0/15 | -0/12 | -0/11 | -0/10 | -0/16 | -0/15 | -0/16 | -0/13   |
| 3650            | 3900            | -0/10 | -0/10 | -0/14 | -0/11 | -0/10 | -0/10 | -0/15 | -0/14 | -0/15 | -0/12   |

الگوی تغییرات شاخص NDSI در طبقات مختلف حاکی از الگوی نوسانی کاهشی تا ارتفاع ۲۱۰۰ متر و سپس از این حد به بعد، الگوی یکنواخت و کاهشی حاکم می‌شود. نکته قابل ملاحظه در تغییرات شاخص NDSI در طبقات ارتفاعی آن است که در ارتفاع حدوداً ۱۴۰۰ متری افزایش NDSI مشاهده می‌شود. ارتفاع ۱۴۰۰ متر بیشتر شامل دشت‌سرهای میانی است. در ارتفاعات پائین‌تر به دلیل تراکم اراضی کشاورزی و زراعی و باغات، کاهش شاخص NDSI وجود دارد. در ارتفاعات بالاتر از ۱۴۰۰ متر به دلیل ورود به عرصه کوهستان کاهش NDSI نمودی بارز دارد. در نتیجه در باند ارتفاعی ۱۴۰۰ متری فراز منحنی NDSI قابل رویت است (شکل ۲۵).

متوسط شاخص شوری BI در طبقات ارتفاعی مختلف در تمامی سال‌های آماری مورد بررسی از ارتفاع کم به زیاد، روند کاهشی نشان می‌دهد. بدین معنا که ارتفاعات به نسبت زمین‌های کم ارتفاع درجه روشنایی پائین‌تری نشان می‌دهند. افزایش ارتفاع با کاهش شاخص BI همراه بوده است. در ارتفاع ۱۴۰۰ متر افت قابل توجه شاخص BI مشاهده می‌شود. در ارتفاعات پائین‌تر شاخص BI تحت تاثیر رسوبات نمکی، رسی و نهشته‌های بادی دارای درجه روشنایی بیشتری است و در ارتفاعات بیش از ۱۴۰۰ متر، به دلیل رسوبات روشن مسیل‌ها، خشکه رودها و مخروط‌های آبرفتی شاخص BI مجدداً افزایش یافته است. در نتیجه در حدود ارتفاع ۱۴۰۰ متر فرود منحنی BI محسوس است (شکل ۲۵).



شکل شماره ۲۵: تغییرات شاخص BI و NDSI در طبقات مختلف ارتفاعی

تحلیل‌های فوق‌الذکر برای شاخص‌های شوری SI-1 و SI-2 نیز انجام گرفت و نوسانات این دو شاخص نیز در طبقات مختلف ارتفاعی بررسی گردید. نتایج در جداول (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

جدول شماره ۹: متوسط شاخص Salinity Index-1 (SI-1) در طبقات مختلف ارتفاعی

| حد پائین | حد بالای | 1987  | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 650      | 900      | 0/692 | 0/680 | 0/649 | 0/669 | 0/705 | 0/643 | 0/635 | 0/639 | 0/660 | 0/664   |
| 900      | 1150     | 0/605 | 0/583 | 0/583 | 0/606 | 0/606 | 0/604 | 0/594 | 0/588 | 0/591 | 0/595   |
| 1150     | 1400     | 0/568 | 0/552 | 0/554 | 0/561 | 0/565 | 0/581 | 0/559 | 0/564 | 0/551 | 0/562   |
| 1400     | 1650     | 0/596 | 0/578 | 0/581 | 0/593 | 0/597 | 0/607 | 0/588 | 0/597 | 0/585 | 0/591   |
| 1650     | 1900     | 0/584 | 0/562 | 0/558 | 0/580 | 0/579 | 0/590 | 0/570 | 0/577 | 0/566 | 0/574   |
| 1900     | 2150     | 0/585 | 0/562 | 0/557 | 0/579 | 0/577 | 0/586 | 0/565 | 0/574 | 0/562 | 0/572   |
| 2150     | 2400     | 0/572 | 0/549 | 0/542 | 0/565 | 0/562 | 0/573 | 0/551 | 0/558 | 0/546 | 0/557   |
| 2400     | 2650     | 0/553 | 0/530 | 0/521 | 0/547 | 0/540 | 0/554 | 0/531 | 0/537 | 0/523 | 0/537   |
| 2650     | 2900     | 0/534 | 0/510 | 0/502 | 0/528 | 0/521 | 0/540 | 0/513 | 0/521 | 0/503 | 0/519   |
| 2900     | 3150     | 0/528 | 0/503 | 0/496 | 0/522 | 0/518 | 0/537 | 0/508 | 0/512 | 0/498 | 0/514   |
| 3150     | 3400     | 0/508 | 0/483 | 0/474 | 0/501 | 0/502 | 0/514 | 0/488 | 0/486 | 0/476 | 0/493   |
| 3400     | 3650     | 0/470 | 0/448 | 0/437 | 0/463 | 0/485 | 0/493 | 0/451 | 0/450 | 0/440 | 0/460   |
| 3650     | 3900     | 0/476 | 0/451 | 0/445 | 0/467 | 0/494 | 0/502 | 0/453 | 0/453 | 0/445 | 0/465   |

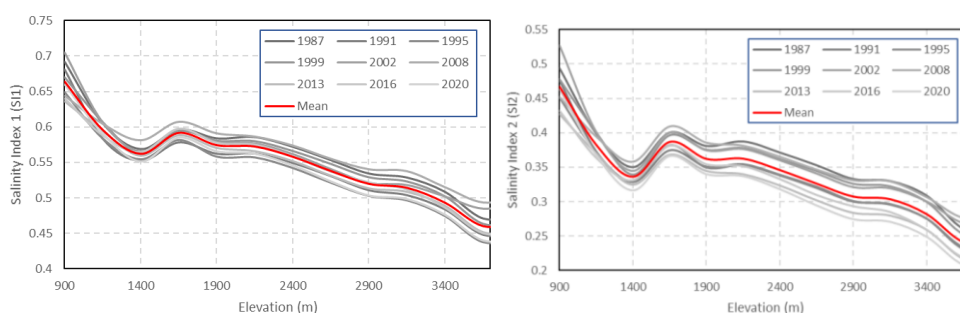
در جدول (۱۰) نوسانات شاخص شوری SI-2 در سال‌های آماری منتخب در طبقات ارتفاعی با گام‌های ۲۵۰ متری، نشان داده شده است.

جدول شماره ۱۰: متوسط شاخص Salinity Index-2 (SI-2) در طبقات مختلف ارتفاعی

| حد پائین | حد بالای | 1987  | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 650      | 900      | 0/494 | 0/475 | 0/451 | 0/478 | 0/526 | 0/451 | 0/426 | 0/432 | 0/464 | 0/466   |
| 900      | 1150     | 0/398 | 0/372 | 0/371 | 0/400 | 0/400 | 0/394 | 0/369 | 0/363 | 0/367 | 0/382   |
| 1150     | 1400     | 0/350 | 0/328 | 0/330 | 0/339 | 0/344 | 0/358 | 0/324 | 0/331 | 0/316 | 0/335   |
| 1400     | 1650     | 0/400 | 0/374 | 0/382 | 0/396 | 0/400 | 0/409 | 0/368 | 0/381 | 0/366 | 0/386   |
| 1650     | 1900     | 0/380 | 0/350 | 0/349 | 0/375 | 0/374 | 0/385 | 0/344 | 0/354 | 0/340 | 0/361   |
| 1900     | 2150     | 0/387 | 0/354 | 0/353 | 0/377 | 0/376 | 0/381 | 0/339 | 0/351 | 0/337 | 0/362   |
| 2150     | 2400     | 0/371 | 0/338 | 0/338 | 0/361 | 0/359 | 0/365 | 0/323 | 0/332 | 0/318 | 0/345   |
| 2400     | 2650     | 0/352 | 0/321 | 0/320 | 0/344 | 0/340 | 0/346 | 0/302 | 0/309 | 0/294 | 0/325   |
| 2650     | 2900     | 0/332 | 0/300 | 0/300 | 0/325 | 0/320 | 0/331 | 0/283 | 0/293 | 0/274 | 0/307   |
| 2900     | 3150     | 0/329 | 0/295 | 0/296 | 0/322 | 0/319 | 0/329 | 0/279 | 0/284 | 0/270 | 0/303   |
| 3150     | 3400     | 0/308 | 0/275 | 0/275 | 0/299 | 0/299 | 0/306 | 0/259 | 0/258 | 0/248 | 0/281   |
| 3400     | 3650     | 0/260 | 0/233 | 0/231 | 0/252 | 0/268 | 0/276 | 0/217 | 0/218 | 0/208 | 0/240   |
| 3650     | 3900     | 0/261 | 0/234 | 0/232 | 0/252 | 0/275 | 0/284 | 0/217 | 0/218 | 0/210 | 0/243   |

همان طور که در جدول ۹ و شکل ۲۶ مشاهده می‌شود، متوسط شاخص شوری SI1 در طبقات ارتفاعی مختلف در تمامی سال‌های آماری مورد بررسی از ارتفاع کم به زیاد، روند کاهشی نشان می‌دهد. بدین معنا که ارتفاعات به نسبت زمین‌های کم ارتفاع درجه شوری پائین‌تری نشان می‌دهند. با افزایش ارتفاع شاخص SI1 کاهش می‌یابد. در ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ متری روند تغییرات دارای شیب تندی بود، به طوری که بعد از ۱۴۰۰ تغییر روند کلی پیدا کرده و با شیب ملایم به ارتفاعات بالاتر ختم می‌گردد.

همان طور که در جدول ۱۰ و شکل ۲۶ مشاهده می‌شود، متوسط شاخص شوری SI2 در طبقات ارتفاعی مختلف در تمامی سال‌های آماری مورد بررسی از ارتفاع کم به زیاد، روند کاهشی نشان می‌دهد. بدین معنا که ارتفاعات به نسبت زمین‌های کم ارتفاع درجه شوری پائین‌تری نشان می‌دهند (کاهش ارتفاع با افزایش شاخص SI2 همراه بوده است). فقط در ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ متری روند تغییرات دارای شیب تندی بود، به طوری که بعد از ۱۴۰۰ تغییر روند کلی پیدا کرده تا بتواند با شیب ملایم به ارتفاعات بالاتر ختم گردد.



شکل شماره ۲۶: تغییرات شاخص SI-1 و SI-2 در طبقات مختلف ارتفاعی

### آنالیز شاخص‌های شوری در طبقات شیب در دوره آماری مورد بررسی

در گام سوم، نوسانات و الگوی تغییرات مکانی-زمانی شاخص‌های شوری منتخب در سال‌های آماری مورد بررسی در منطقه مطالعاتی، در ارتباط با مولفه شیب زمین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در جداول (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. جدول (۱۱) متوسط شاخص BI در طبقات شیب با فواصل پی در پی ۵ درجه‌ای را در سال‌های آماری منتخب بین ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱۱: متوسط شاخص (BI) Brightness Index در طبقات مختلف ارتفاعی

| حد پائین شیب | حد بالای شیب | 1987   | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|--------------|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0            | 5            | 0/3636 | 0/340 | 0/342 | 0/358 | 0/365 | 0/356 | 0/357 | 0/362 | 0/363 | 0/356   |
| 5            | 10           | 0/3153 | 0/291 | 0/293 | 0/308 | 0/308 | 0/313 | 0/311 | 0/315 | 0/308 | 0/307   |
| 10           | 15           | 0/3005 | 0/277 | 0/278 | 0/294 | 0/293 | 0/301 | 0/297 | 0/301 | 0/293 | 0/293   |
| 15           | 20           | 0/2944 | 0/271 | 0/271 | 0/289 | 0/288 | 0/296 | 0/292 | 0/295 | 0/287 | 0/287   |
| 20           | 25           | 0/2915 | 0/267 | 0/268 | 0/287 | 0/286 | 0/295 | 0/289 | 0/292 | 0/284 | 0/284   |
| 25           | 30           | 0/2879 | 0/263 | 0/264 | 0/284 | 0/283 | 0/292 | 0/286 | 0/288 | 0/280 | 0/281   |
| 30           | 35           | 0/2819 | 0/257 | 0/257 | 0/278 | 0/278 | 0/287 | 0/281 | 0/282 | 0/274 | 0/275   |
| 35           | 40           | 0/2751 | 0/249 | 0/250 | 0/272 | 0/272 | 0/281 | 0/276 | 0/275 | 0/267 | 0/268   |
| 40           | 45           | 0/2665 | 0/240 | 0/241 | 0/264 | 0/265 | 0/275 | 0/269 | 0/267 | 0/259 | 0/261   |
| 45           | 50           | 0/2579 | 0/232 | 0/232 | 0/256 | 0/259 | 0/269 | 0/263 | 0/259 | 0/252 | 0/253   |
| 50           | 55           | 0/2620 | 0/235 | 0/236 | 0/260 | 0/263 | 0/272 | 0/267 | 0/261 | 0/254 | 0/256   |
| 55           | 60           | 0/2569 | 0/230 | 0/229 | 0/253 | 0/258 | 0/266 | 0/262 | 0/253 | 0/246 | 0/250   |
| 60           | 65           | 0/2468 | 0/222 | 0/221 | 0/246 | 0/249 | 0/255 | 0/248 | 0/236 | 0/228 | 0/239   |
| 65           | 69/73        | 0/2436 | 0/225 | 0/217 | 0/237 | 0/244 | 0/258 | 0/245 | 0/249 | 0/236 | 0/239   |

همان‌طور که در جدول (۱۱) ملاحظه می‌شود، شاخص BI با افزایش شیب اراضی کاهش می‌یابد و این الگو تقریباً با شدت و ضعف در تمامی سال‌های آماری منتخب نیز مشاهده می‌شود. در جدول (۱۲) متوسط شاخص NDSI در طبقات مختلف شیب با گام‌های ۵ درجه‌ای در سال‌های آماری منتخب نشان داده شده است.

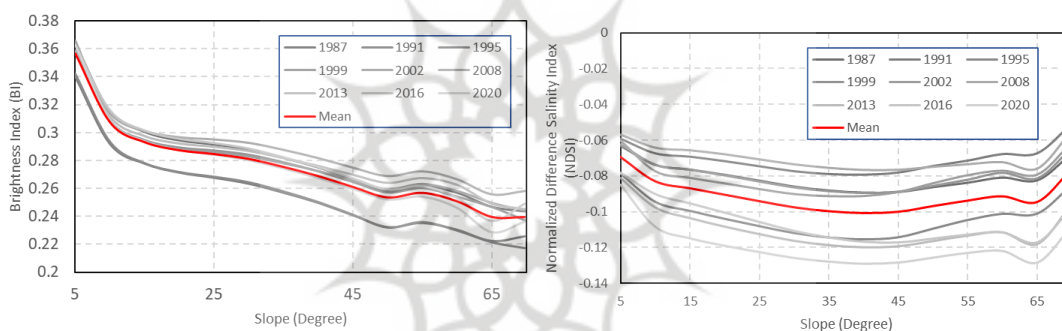
جدول شماره ۱۲: متوسط شاخص (NDSI) Normalized Difference Salinity Index در طبقات مختلف شیب

| حد پائین شیب | حد بالای شیب | 1987  | 1991  | 1995  | 1999  | 2002  | 2008  | 2013  | 2016  | 2020  | میانگین |
|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0            | 5            | -0/06 | -0/05 | -0/07 | -0/06 | -0/06 | -0/05 | -0/08 | -0/07 | -0/08 | -0/06   |
| 5            | 10           | -0/07 | -0/06 | -0/09 | -0/07 | -0/07 | -0/06 | -0/09 | -0/09 | -0/10 | -0/08   |
| 10           | 15           | -0/07 | -0/06 | -0/09 | -0/07 | -0/08 | -0/06 | -0/10 | -0/09 | -0/11 | -0/08   |
| 15           | 20           | -0/07 | -0/07 | -0/10 | -0/07 | -0/08 | -0/06 | -0/10 | -0/10 | -0/11 | -0/09   |
| 20           | 25           | -0/08 | -0/07 | -0/10 | -0/08 | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/10 | -0/12 | -0/09   |
| 25           | 30           | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/08 | -0/09 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 30           | 35           | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/08 | -0/09 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 35           | 40           | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/08 | -0/09 | -0/07 | -0/12 | -0/11 | -0/12 | -0/10   |
| 40           | 45           | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/08 | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/10   |
| 45           | 50           | -0/08 | -0/07 | -0/10 | -0/08 | -0/08 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 50           | 55           | -0/08 | -0/07 | -0/10 | -0/08 | -0/07 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 55           | 60           | -0/08 | -0/06 | -0/10 | -0/07 | -0/07 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 60           | 65           | -0/08 | -0/06 | -0/10 | -0/08 | -0/07 | -0/07 | -0/11 | -0/11 | -0/12 | -0/09   |
| 65           | 69/73        | -0/06 | -0/05 | -0/08 | -0/06 | -0/06 | -0/05 | -0/09 | -0/09 | -0/10 | -0/07   |



جدول ۱۱ و شکل ۲۷ متوسط شاخص BI در طبقات شیب را نشان می‌دهد، با افزایش شیب ضریب روشنایی کاهش می‌یابد. کمترین میزان شاخص BI در شیب‌های کمتر از ۵ درجه و بیشترین مقدار در اراضی با بیش از ۶۵ درجه شیب مشاهده شد. اراضی با شیب کمتر از ۵ درجه که منطبق با دشت‌های هموار (شامل چاله‌ها، کفه‌های رسی و گلی و پلایاها) می‌باشد، به دلیل تجمع نمک، رسوبات رس و رسوبات بادی با رنگ روشن، دارای بیشترین مقدار BI می‌باشد. در نواحی پرشیب منطبق با سازندهای آتشفشانی که عمدتاً در ارتفاعات کرکس، برف‌انبار و مارشان قرار دارند، به دلیل سازندها و رسوبات آتشفشانی تیره رنگ، کمترین مقدار BI مشاهده می‌شود.

مرور نتایج به دست آمده در جدول ۱۲ و شکل ۲۷ نشان می‌دهد که به طور کلی در تمامی سال‌های آماری منتخب، با افزایش شیب، شاخص NDSI با کاهش همراه است. بدین معنا که با افزایش شیب تا میزان ۴۵ درجه این شاخص کاهش می‌یابد و از آستانه شیب ۴۵ درجه به بالا با افزایش شیب این شاخص به صورت ملایم افزایش می‌یابد. در عین حال از شیب ۶۰ تا ۶۵ درجه تغییر کاهشی محسوسی قابل مشاهده است. از شیب ۶۵ درجه به بالا، میزان شوری به شدت کاهش می‌یابد (افزایش شاخص NDSI). دلیل این مسئله در انطباق این نواحی با زون آتشفشانی سه‌د-بزمان و مواجهه با سازندهای آتشفشانی و دگرگونی تیره رنگ می‌باشد.



شکل شماره ۲۷ تغییرات شاخص BI و NDSI در طبقات مختلف شیب

در جداول (۱۳) و (۱۴) متوسط شاخص‌های شوری SI-1 و SI-2 در طبقات مختلف شیب اراضی در سال‌های آماری مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول شماره ۱۳: متوسط شاخص Salinity Index-1 (SI-1) در طبقات مختلف شیب

| حد پائین شیب | حد بالای شیب | 1987       | 1991       | 1995       | 1999       | 2002       | 2008       | 2013       | 2016       | 2020       | میانگین    |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0            | 5            | 0/615<br>7 | 0/595<br>6 | 0/590<br>5 | 0/609<br>4 | 0/616<br>0 | 0/610<br>0 | 0/595<br>7 | 0/599<br>5 | 0/597<br>7 | 0/603<br>3 |
| 5            | 10           | 0/566<br>6 | 0/547<br>0 | 0/541<br>1 | 0/560<br>9 | 0/558<br>9 | 0/571<br>0 | 0/549<br>8 | 0/555<br>1 | 0/542<br>8 | 0/554<br>8 |
| 10           | 15           | 0/552<br>5 | 0/533<br>6 | 0/525<br>5 | 0/547<br>4 | 0/545<br>1 | 0/559<br>4 | 0/535<br>5 | 0/540<br>5 | 0/527<br>4 | 0/540<br>8 |
| 15           | 20           | 0/545<br>7 | 0/526<br>5 | 0/517<br>8 | 0/541<br>2 | 0/538<br>8 | 0/554<br>2 | 0/528<br>8 | 0/533<br>3 | 0/520<br>1 | 0/534<br>0 |
| 20           | 25           | 0/541<br>6 | 0/521<br>8 | 0/512<br>9 | 0/537<br>8 | 0/535<br>3 | 0/551<br>3 | 0/525<br>0 | 0/528<br>4 | 0/515<br>7 | 0/530<br>0 |
| 25           | 30           | 0/537<br>1 | 0/516<br>6 | 0/507<br>6 | 0/533<br>9 | 0/531<br>5 | 0/547<br>9 | 0/520<br>9 | 0/523<br>0 | 0/511<br>0 | 0/525<br>5 |
| 30           | 35           | 0/531<br>2 | 0/510<br>2 | 0/500<br>8 | 0/528<br>5 | 0/527<br>0 | 0/542<br>7 | 0/515<br>8 | 0/516<br>4 | 0/505<br>3 | 0/519<br>8 |
| 35           | 40           | 0/525<br>1 | 0/503<br>5 | 0/493<br>7 | 0/522<br>8 | 0/522<br>8 | 0/537<br>2 | 0/510<br>8 | 0/509<br>7 | 0/499<br>2 | 0/513<br>9 |

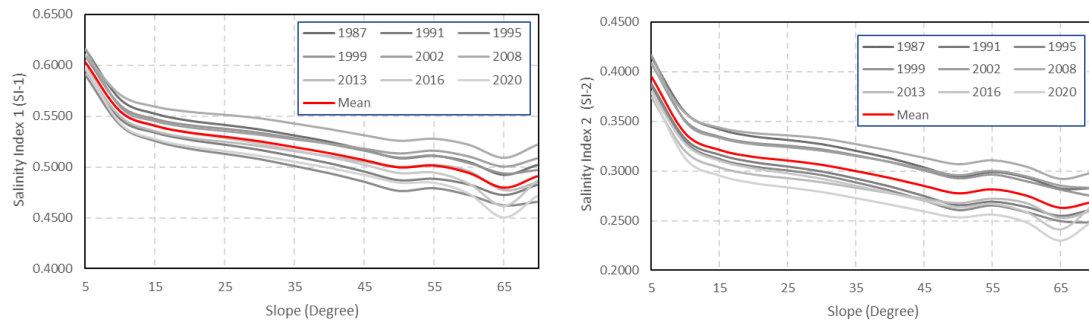
|    |       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|----|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 40 | 45    | 0/517<br>3 | 0/495<br>3 | 0/485<br>3 | 0/516<br>2 | 0/517<br>8 | 0/531<br>2 | 0/505<br>5 | 0/502<br>2 | 0/492<br>3 | 0/507<br>0 |
| 45 | 50    | 0/509<br>0 | 0/486<br>8 | 0/476<br>3 | 0/509<br>3 | 0/513<br>1 | 0/525<br>7 | 0/500<br>2 | 0/493<br>9 | 0/484<br>7 | 0/499<br>9 |
| 50 | 55    | 0/511<br>3 | 0/488<br>2 | 0/479<br>0 | 0/511<br>4 | 0/515<br>9 | 0/527<br>7 | 0/502<br>5 | 0/494<br>5 | 0/484<br>6 | 0/501<br>7 |
| 55 | 60    | 0/505<br>3 | 0/482<br>6 | 0/472<br>2 | 0/504<br>0 | 0/510<br>1 | 0/521<br>8 | 0/496<br>2 | 0/483<br>6 | 0/473<br>9 | 0/494<br>4 |
| 60 | 65    | 0/492<br>8 | 0/472<br>2 | 0/462<br>1 | 0/493<br>8 | 0/500<br>1 | 0/509<br>0 | 0/477<br>6 | 0/461<br>4 | 0/450<br>6 | 0/480<br>0 |
| 65 | 69/73 | 0/502<br>3 | 0/482<br>2 | 0/465<br>6 | 0/497<br>2 | 0/508<br>1 | 0/521<br>6 | 0/485<br>1 | 0/486<br>2 | 0/471<br>6 | 0/491<br>1 |

همان طور که از نتایج ارائه شده در جدول (۱۳) بر می‌آید، افزایش شیب اراضی به طور کلی با کاهش نرخ شوری شاخص SI-1 هماهنگ است. در جدول (۱۴) همین آنالیز برای شاخص شوری SI-2 انجام گرفت و نوسانات این شاخص در طبقات شیب بررسی شد که نتایج در جدول (۱۴) ارائه شده است.

جدول شماره ۱۴: متوسط شاخص Salinity Index-2 (SI-2) در طبقات مختلف شیب

| حد پائین شیب | حد بالای شیب | 1987       | 1991       | 1995       | 1999       | 2002       | 2008       | 2013       | 2016       | 2020       | میانگین    |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0            | 5            | 0/414<br>5 | 0/387<br>7 | 0/385<br>2 | 0/408<br>1 | 0/416<br>9 | 0/406<br>7 | 0/374<br>2 | 0/379<br>8 | 0/378<br>8 | 0/394<br>7 |
| 5            | 10           | 0/358<br>6 | 0/332<br>3 | 0/329<br>3 | 0/350<br>5 | 0/349<br>8 | 0/357<br>9 | 0/319<br>8 | 0/326<br>8 | 0/312<br>6 | 0/337<br>5 |
| 10           | 15           | 0/341<br>9 | 0/316<br>5 | 0/312<br>1 | 0/334<br>5 | 0/333<br>7 | 0/343<br>7 | 0/303<br>7 | 0/310<br>2 | 0/295<br>4 | 0/321<br>3 |
| 15           | 20           | 0/334<br>8 | 0/309<br>0 | 0/304<br>7 | 0/328<br>2 | 0/327<br>3 | 0/338<br>3 | 0/296<br>7 | 0/302<br>4 | 0/287<br>8 | 0/314<br>4 |
| 20           | 25           | 0/331<br>2 | 0/304<br>7 | 0/300<br>6 | 0/325<br>6 | 0/324<br>4 | 0/336<br>0 | 0/293<br>0 | 0/297<br>5 | 0/283<br>5 | 0/310<br>7 |
| 25           | 30           | 0/326<br>9 | 0/299<br>7 | 0/296<br>0 | 0/322<br>0 | 0/320<br>8 | 0/333<br>0 | 0/288<br>9 | 0/292<br>0 | 0/278<br>8 | 0/306<br>4 |
| 30           | 35           | 0/320<br>2 | 0/292<br>5 | 0/288<br>7 | 0/315<br>9 | 0/315<br>4 | 0/327<br>2 | 0/283<br>4 | 0/284<br>9 | 0/272<br>7 | 0/300<br>1 |
| 35           | 40           | 0/312<br>8 | 0/284<br>6 | 0/280<br>5 | 0/309<br>0 | 0/309<br>5 | 0/320<br>7 | 0/277<br>9 | 0/277<br>7 | 0/266<br>2 | 0/293<br>2 |
| 40           | 45           | 0/303<br>5 | 0/275<br>0 | 0/270<br>7 | 0/300<br>8 | 0/302<br>5 | 0/313<br>5 | 0/272<br>3 | 0/270<br>0 | 0/259<br>3 | 0/285<br>3 |
| 45           | 50           | 0/294<br>2 | 0/265<br>7 | 0/260<br>8 | 0/292<br>8 | 0/296<br>0 | 0/307<br>1 | 0/267<br>9 | 0/263<br>1 | 0/253<br>1 | 0/277<br>9 |
| 50           | 55           | 0/298<br>9 | 0/269<br>3 | 0/265<br>5 | 0/296<br>5 | 0/300<br>5 | 0/311<br>0 | 0/272<br>4 | 0/266<br>6 | 0/256<br>0 | 0/281<br>9 |
| 55           | 60           | 0/293<br>4 | 0/263<br>9 | 0/258<br>9 | 0/289<br>9 | 0/295<br>0 | 0/304<br>7 | 0/268<br>0 | 0/258<br>5 | 0/248<br>2 | 0/275<br>6 |
| 60           | 65           | 0/282<br>2 | 0/255<br>0 | 0/249<br>7 | 0/281<br>5 | 0/285<br>6 | 0/292<br>4 | 0/253<br>0 | 0/241<br>1 | 0/229<br>8 | 0/263<br>4 |
| 65           | 69/73        | 0/282<br>5 | 0/261<br>6 | 0/248<br>2 | 0/274<br>9 | 0/283<br>1 | 0/298<br>6 | 0/260<br>5 | 0/264<br>9 | 0/249<br>4 | 0/269<br>3 |

نتایج به دست آمده از جدول (۱۴) نیز ارتباط معکوس افزایش شیب با کاهش شوری بر اساس شاخص SI-2 را تأیید می‌کند. در شکل (۲۸) همین نتایج به صورت گراف نوسانات این دو شاخص را در طبقات شیب نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۲۸) ملاحظه می‌شود، افزایش شیب در هر دو شاخص SI-1 و SI-2 روند کاهشی دارد. بدین معنا که اراضی با شیب کمتر نرخ شوری بیشتر و اراضی با شیب بیشتر، نرخ شوری کمتری دارند.

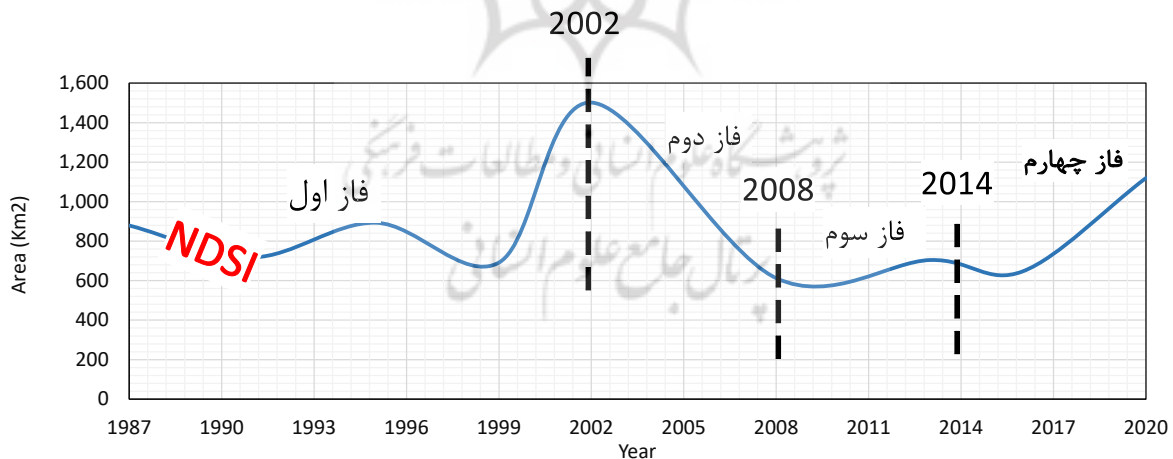


شکل شماره ۲۸: تغییرات شاخص Salinity Index-1,2 (SI-1,2) در طبقات مختلف شیب

تغییرات شاخص های شوری در محدوده مطالعاتی در شکل ۲۹ نشان داده شده است. نتایجی که در شکل مشاهده می شود بر اساس آستانه ۰/۶ محاسبه شده است.

با بررسی تغییرات سطوح مقادیر عددی شاخص های منتخب چهار آستانه زمانی تغییرات مشخص گردید. بر اساس این چهار آستانه، چهار فاز تغییرات تعیین گردید؛ به این صورت که فاز اول از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ را پوشش می دهد. فاز دوم شامل سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ می شود. فاز سوم از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ طول کشیده و نهایتاً فاز چهارم از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ را در بر می گیرد.

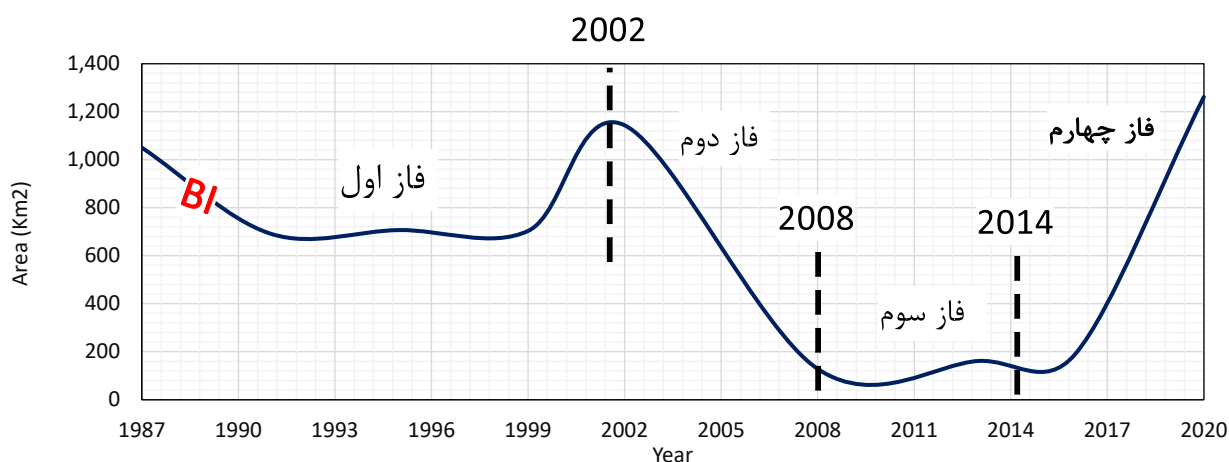
الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص  $NDSI > 0.6$  در شکل ۲۹ نشان داده شده است. فازهای چهارگانه در مورد این شاخص محیطی نیز مشاهده می شود. فاز اول از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ شرایط افزایشی سطوح  $NDSI > 0.6$  حاکم است. این وضعیت تا سال ۲۰۰۲ ادامه دارد. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ فاز دوم به صورت کاهش شدید غالب شده و در بین سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ فاز سوم که شرایط نسبتاً پایدار است حاکمیت می یابد. در نهایت فاز چهارم با روند افزایشی تند از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ ادامه پیدا می نماید.



شکل شماره ۲۹: الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص NDSI در فازهای چهارگانه

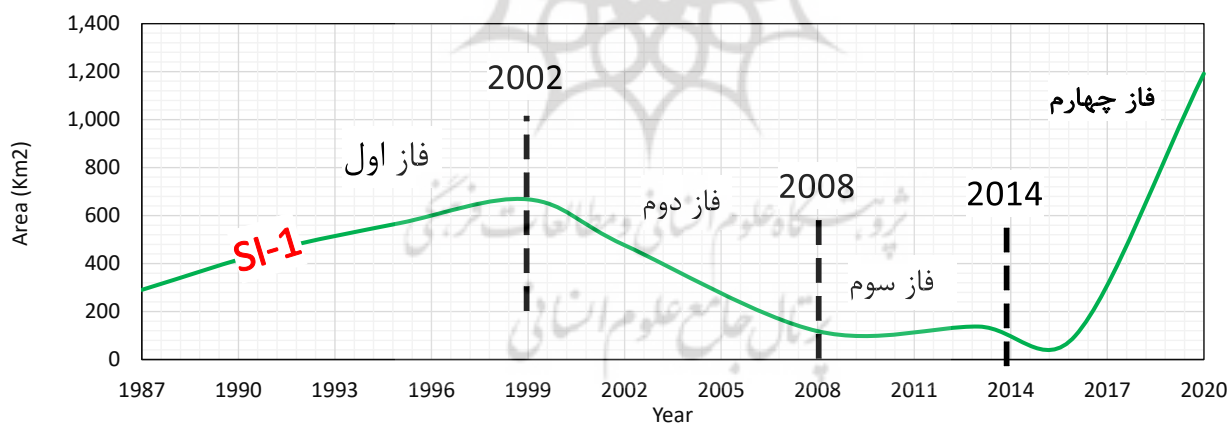
الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص  $BI > 0.8$  در شکل ۳۰ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود، فازهای چهارگانه در مورد این شاخص محیطی نیز صادق است. در فاز اول که از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ به طول انجامیده، شرایط افزایش شاخص BI غلبه دارد. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ در فاز دوم شرایط کاهش نسبتاً تندی حاکم می شود. فاز سوم که از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ می باشد؛ شرایط نسبتاً پایدار حاکمیت می یابد و در نهایت فاز چهارم با شیب بسیار تند از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ ادامه می یابد.





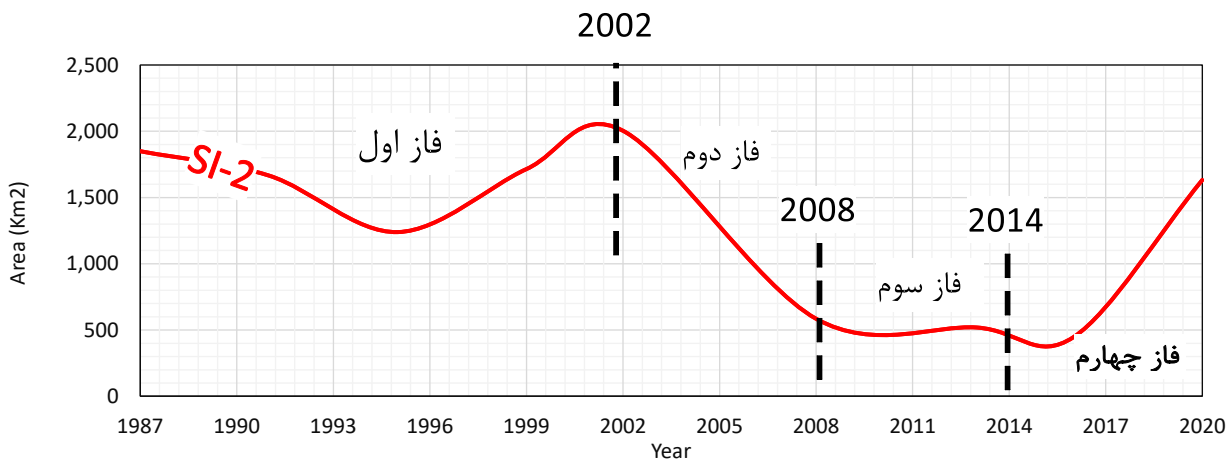
شکل شماره ۳۰: الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص BI در فازهای چهار گانه

الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص شوری  $SI-1 > 0.6$  در شکل ۳۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، فازهای چهارگانه در مورد تغییرات سطوح این شاخص نیز صدق می کند. فاز اول از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ با روند نسبتاً افزایشی ادامه می یابد. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ در فاز دوم روند کاهشی غالب می گردد. در فاز سوم از ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ شرایط ثبات بدون روند خاصی حاکمیت می یابد و نهایتاً در فاز چهارم از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ گسترش سطوح  $SI-1 > 0.6$  مشهود است.



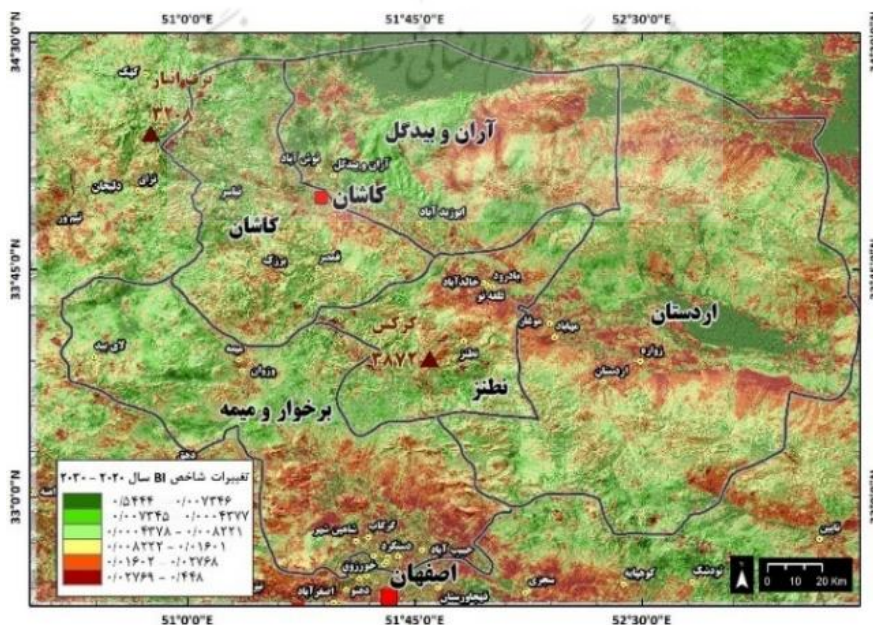
شکل شماره ۳۱: الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص SI-1 در فازهای چهار گانه

الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص شوری  $SI-2 > 0.6$  در شکل ۳۲ نشان داده شده است. فازهای چهارگانه در تغییرات سطوح این شاخص نیز قابل ردیابی است. فاز نخست از ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ با روند کلی افزایشی مشخص است. فاز دوم از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ روند کاهشی با شیب تند را نشان می دهد. فاز سوم از ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ شرایط ثبات را نشان می دهد و فاز چهارم از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ با شیب نسبتاً تند سطوح  $SI-2 > 0.6$  به سرعت افزایش می یابد.

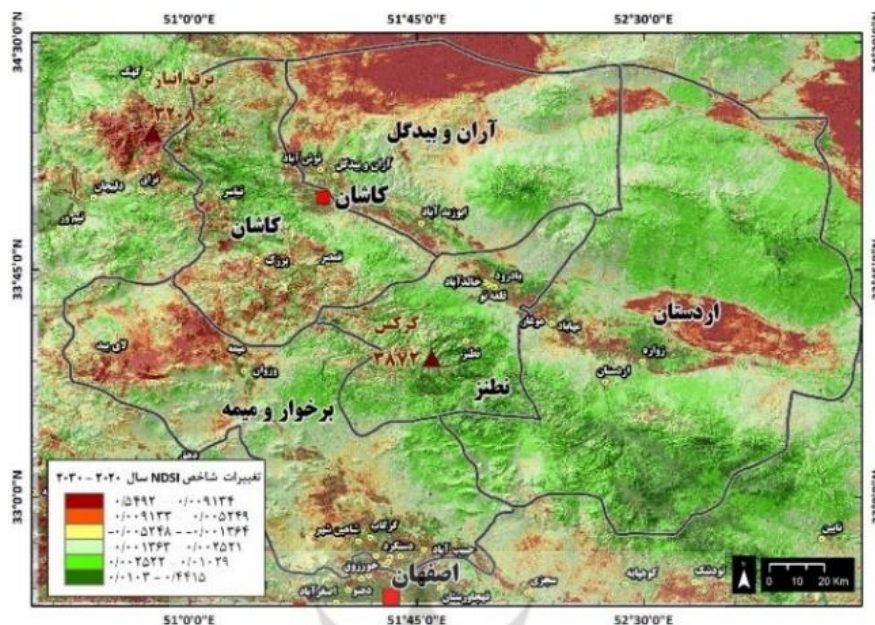


شکل شماره ۳۲: الگوی تغییرات زمانی سطوح شاخص SI-2 در فازهای چهار گانه

بر اساس روابط همبستگی و تحلیل رگرسیون خطی شرایط شاخص‌های شوری در دهه آتی تا سال ۲۰۳۰ مورد بازسازی قرار گرفت. نتایج در اشکال ۳۳ تا ۳۶ نشان داده شده است. شکل ۳۳-۳۴ پیش‌بینی تغییرات فضایی شاخص شوری BI و NDSI را نشان می‌دهد. در شکل ۳۳ که مربوط به شاخص BI است، نواحی طیف قرمز رنگ مربوط به نواحی می‌باشد که میزان BI تا سال ۲۰۳۰ در آن جا افزایش خواهد داشت و نواحی به سمت طیف سبز شامل مناطقی است که شاخص BI کاهش خواهد یافت (شکل ۳۳). بر اساس نتایج به دست آمده دشت سرهای محور جنوبی دق سرخ شامل اراضی کاشان تا اردستان در وضعیت بحرانی قرار خواهند گرفت. شکل ۳۴ مربوط به پیش‌بینی تغییرات شاخص شوری NDSI تا سال ۲۰۳۰ می‌باشد. بر اساس این نقشه، نواحی محور کاشان تا اردستان به دلیل دخالت‌های انسانی با ناهمگونی و به هم ریختگی نوسانات شاخص NDSI روبرو می‌گردد. نواحی حوضه‌های انتهایی و چاله‌ها نیز با افزایش غلظت شوری روبرو می‌شوند.

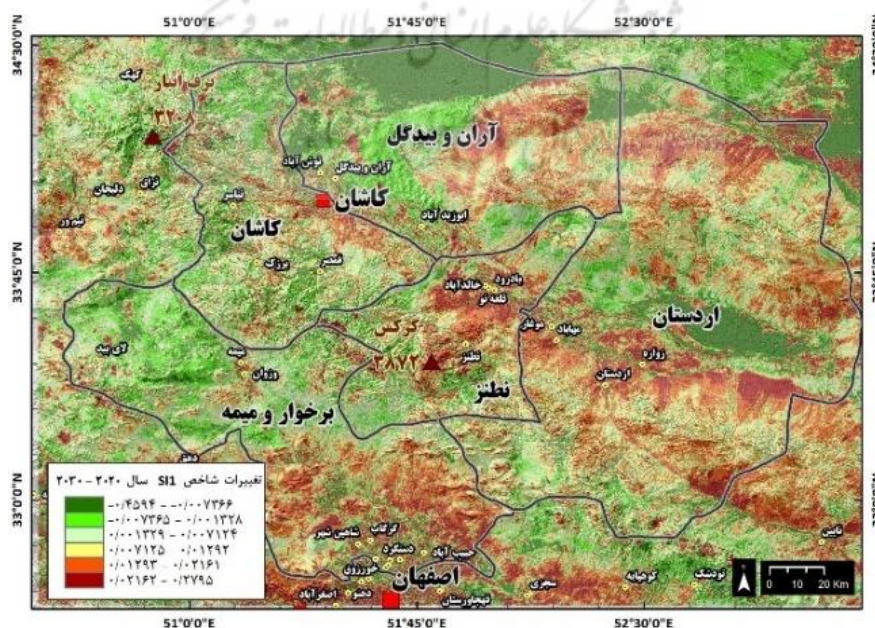


شکل شماره ۳۳: پیش‌بینی تغییرات فضایی شاخص شوری BI در سال ۲۰۳۰



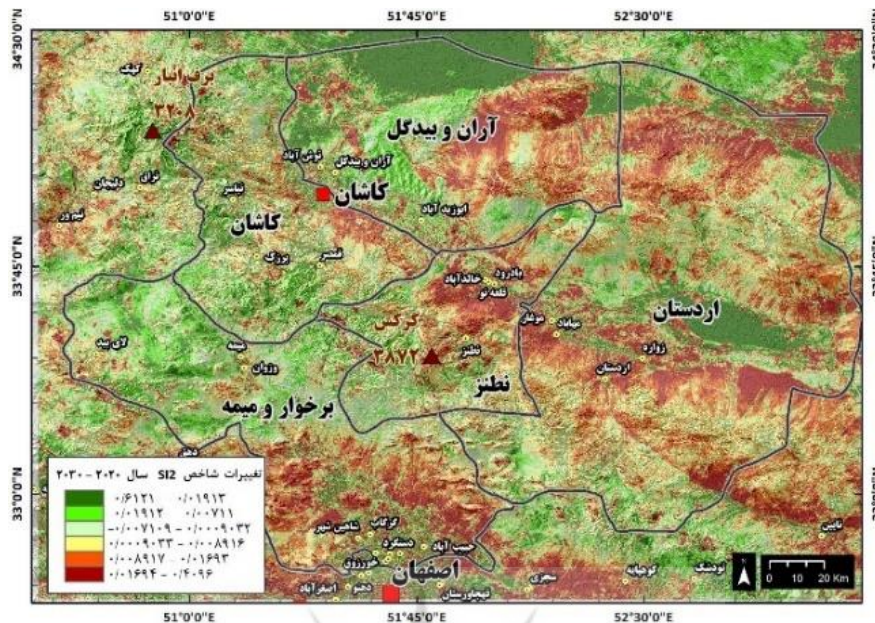
شکل شماره ۳۴: پیش‌بینی تغییرات فضایی شاخص شوری NDSI در سال ۲۰۳۰

شکل ۳۵ و ۳۶ مربوط به پیش‌بینی تغییرات شاخص‌های شوری SI-1 و SI-2 تا سال ۲۰۳۰ می‌باشد. در مورد هر دو نمایه شوری، اراضی و دشت سرهای محور جنوبی دق سرخ از کاشان تا اردستان با شرایط بحرانی روبرو خواهند شد. همان‌طور که در اشکال ۳۶ و ۳۵ مشاهده می‌شود، مخروط‌های آبرفتی و قاعده دلتاهایی که وارد چاله دق سرخ می‌شوند با شرایط بحرانی‌تر روبرو خواهند شد و نیاز به توجه بیشتر سازمان‌ها و ارگان‌های مدیریت اراضی و نواحی بیابانی خواهند داشت. نکته قابل توجه دیگر آن است که از دشت سر بالایی به سمت دشت سر انتهایی، وخامت اوضاع و شرایط، تشدید می‌گردد که توجه بیشتر مهندسین و مدیران محیط زیست و منابع طبیعی را مطالبه می‌نماید.



شکل شماره ۳۵: پیش‌بینی تغییرات فضایی شاخص شوری SI-1 در سال ۲۰۳۰





شکل شماره ۳۶: پیش بینی تغییرات فضایی شاخص شوری SI-2 در سال ۲۰۳۰

### نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج به دست آمده از شاخص‌های شوری در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، که در بخش‌های مرکزی، شمالی و شرقی منطقه مطالعاتی نسبتاً مقادیر شاخص‌های شوری بیش از بخش‌های غربی و جنوب غربی است. بخش‌های شمالی و شرقی منطقه مورد مطالعه را بیشتر چاله‌ها، پلایاها و حوضه‌های انتهایی پوشش داده است که به دلیل تجمع آب‌ها و هرزآب‌های فصلی و خشک شدن در طول فصل گرم رسوبات گچی و نمکی که دارای رنگ روشن‌تری هستند را در خود متمرکز ساخته است. در نتیجه عمدتاً همه شاخص‌های شوری مقادیری بیشتری را در این محدوده نشان می‌دهند. در نواحی جنوبی و غربی که عمدتاً توسط سازندهای سنگی و آتشفشانی پوشش داده شده‌اند و دارای رنگ تیره می‌باشند، شاخص‌های شوری ماهواره‌ای مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. این روند در همه شاخص‌های شوری مورد مطالعه در تمامی سال‌های منتخب و مورد بررسی مشاهده می‌شود. شاخص موقعیت توپوگرافیک یا TPI که منطبق با برجستگی‌ها و فرورفتگی‌ها است، در طبقه‌بندی لندفرم‌های زمین مورد استفاده قرار گرفت و انطباق بسیار بالایی با شاخص‌های شوری ماهواره‌ای نشان داد. بدین معنا که افزایش TPI با کاهش شاخص‌های شوری همراه است. دلیل این موضوع در جهت زهکشی سطحی و آبشویی اراضی و خاک‌ها است که منجر به کاهش شوری در نواحی با TPI بالاتر و افزایش شوری در اراضی با TPI کمتر می‌گردد. به طور کلی طبقات لندفرمی از واحد برآمدگی‌ها و ارتفاعات به سمت واحد دشت‌های هموار با کاهش شاخص TPI و افزایش شاخص‌های شوری ماهواره‌ای در تقریباً همه شاخص‌های مورد بررسی همراه است. در کل در واحد دشت‌های هموار بالاترین میزان شاخص‌های شوری و در واحد برآمدگی‌ها و ارتفاعات و دشت‌ها کمترین میزان شوری در اراضی محدوده مورد مطالعه مشاهده شد که دلیل این موضوع در پوشش‌های سنگی و سازندهای آتشفشانی در نواحی مرتفع، آبشویی زهکشی از نواحی مرتفع به سمت چاله‌ها و تجمع هرزآب‌ها و آب‌های فصلی در نواحی کم ارتفاع و چاله‌ها در فصول گرم و تبخیر و کشش کاپیلاری در حوضه‌های انتهایی، پلایاها و چاله‌ها می‌باشد. شاخص‌های شوری ماهواره‌ای در طبقات مختلف ارتفاعی نیز بررسی شده که نتایج از کاهش میزان شوری با افزایش ارتفاع حکایت دارد. کاهش شوری با ارتفاع در طبقات ارتفاعی پائین‌تر شیب بیشتری دارد و بعد از ارتفاع ۱۴۰۰ متر این شیب تغییرات، کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع مربوط به آستانه ۱۴۰۰ متری می‌باشد که محل اتصال دشت‌ها به نواحی کوهستانی است. بدین معنا که در حوضه‌های انتهایی و چاله‌ها و پلایاها تا حد بالای دشت‌ها افت شوری با ارتفاع با شیب بالا اتفاق می‌افتد ولی با ورود به عرصه واحد برآمدگی‌ها و ارتفاعات، کاهش

شوری با ارتفاع شیب ملایم به خود می‌گیرد که این مسئله در تمام نمودارهای مربوط به ارتباط شاخص‌های شوری با ارتفاع به خوبی ملاحظه می‌شود. نوسانات شاخص‌های شوری ماهواره‌ای، در طبقات مختلف شیب با فواصل پی در پی ۵ درجه‌ای نیز نشان از کاهش شاخص‌های شوری با افزایش شیب دارد؛ به جز شاخص NDSI سه شاخص دیگر یعنی BI، SI1 و SI2 با افزایش شیب، کاهش می‌یابند. شاخص NDSI به دلیل تاثیر پذیری از پوشش گیاهی خصوصا تحت تاثیر پوشش گیاهی مربوط به نواحی باغات و زراعت و کشاورزی روستاها در بخش‌های نزدیک به چاله‌های مرکزی، از این الگو فاصله گرفته است. در شیب‌های کمتر از ۱۵ درجه افزایش شیب با شدت بیشتری به کاهش شوری منجر می‌شود؛ ولی در شیب‌های بالای ۱۵ درجه این روند ملایم‌تر است. دلیل این آستانه، انطباق آن بر خط کنیک و آستانه واحد دشت‌سر و کوهستان می‌باشد که در نمودارهای مربوط به رابطه شوری و ارتفاع نیز وضعیت مشابهی، مشاهده می‌شود.

بررسی تغییرات شاخص‌های شوری در محدوده مطالعاتی بر اساس آستانه ۰/۶ حاکی از استیلاي چهار فاز در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ می‌باشد. که فاز چهارم از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ با شیب تند در حال افزایش بوده است. بر اساس روابط همبستگی و تحلیل رگرسیون خطی شرایط شاخص‌های شوری در دهه آتی تا سال ۲۰۳۰ مورد بازسازی قرار گرفت. در شاخص BI بر اساس نقشه‌های پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ دشت سرهای محور جنوبی دق سرخ شامل اراضی کاشان تا اردستان در شرایط بحرانی قرار خواهند گرفت. شاخص NDSI نیز در محور کاشان تا اردستان به دلیل دخالت‌های انسانی با ناهمگونی و به هم ریختگی روبرو می‌گردد. نواحی حوضه‌های انتهایی و چاله‌ها با افزایش غلظت شوری روبرو می‌شوند. شاخص‌های شوری SI1,2 بر اساس نقشه‌های پیش‌بینی ۲۰۳۰، شرایط بحرانی در اراضی و دشت سرهای محور جنوبی دق سرخ از کاشان تا اردستان را نشان می‌دهند. علاوه بر این نیز مخروط‌های آبرفتی و قاعده دلتاهایی که وارد چاله دق سرخ می‌شوند با شرایط حاد روبرو می‌گردند. نهایتاً آن که از دشت‌سر بالایی به سمت دشت‌سر انتهایی، وخامت اوضاع و شرایط تشدید می‌گردد که لزوم توجه بیشتر مهندسین و مدیران محیط زیست و منابع طبیعی را مطالبه می‌نماید.

حبشی و همکاران (۱۳۹۶) ضمن ارزیابی شوری خاک در شرق اصفهان با استفاده از داده‌های عددی ماهواره‌ای به تحلیل ارتباط آن با عوارض توپوگرافیکی (ارتفاع، شیب) پرداخته‌اند. آنها شاخص‌های شوری SI1 و SI2 را از داده‌های لندست برآورد نموده و همبستگی بین شاخص‌های شوری و عوارض توپوگرافی را به صورت معنادار گزارش کرده‌اند که نتایج آنها با نتایج به دست آمده از این پژوهش همخوانی نشان می‌دهد. نیک‌پور و همکاران (۱۴۰۰) نیز به پایش شوری خاک با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری پرداخته‌اند. آنها در استان ایلام بر اساس داده‌های رقومی ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ شاخص‌های NDSI، BI و SI را مورد پایش قرار داده و سپس در عملیات آزمایشگاهی نتایج شوری خاک را با داده‌ای ماهواره‌ای مقایسه کردند و نتایج به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای را تأیید کردند. با توجه به شاخص‌های شوری مشابه و دوره آماری تقریباً مشابه می‌توان صحت نتایج به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای و تطابق با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی را تأیید نمود. مکرم و نگهبان (۱۳۹۷) نیز شوری خاک و ارتباط آن با واحدهای لندفرمی بر پایه TPI را در غرب شیراز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها ارتباط معنادار و همبستگی قوی بین فرم اراضی و واحدهای فرم شناسی با درجه شوری خاک تأیید نموده است.

بدین ترتیب به نظر می‌رسد که یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر نیز با تحقیقات فوق انطباق و هماهنگی نشان می‌دهد. در عین حال، تفاوت و مزیت پژوهش حاضر با مطالعات متناظر نیز شامل استفاده از شاخص‌های شوری متنوع‌تر، دوره آماری گسترده‌تر، استفاده از شاخص TPI در شناسایی لندفرم‌ها و بررسی ارتباط آن با شاخص‌های شوری منتخب، پردازش ماشینی (با استفاده از زبان اسکریپت نویسی پایتون) تصاویر ماهواره‌ای از منطقه با فراوانی بالا، پیش‌بینی فضایی شاخص‌های شوری بر اساس مدل یادگیری ماشین به روش رگرسیون خطی و فازبندی تغییرات شوری در دوره آماری مورد مطالعه، می‌گردد.

## منابع

- اخضری، د.، میآبادی اسدی، ا.، ۱۳۹۵. تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های سنجنده OLI و داده‌های میدانی مطالعه موردی جنوب دشت ملایر، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال هفتم، شماره ۲، صص ۸۷-۱۰۰.
- اداره تحقیقات هواشناسی کاربردی. ۱۳۹۹. آشکارسازی تغییرات اقلیمی استان اصفهان. اصفهان.
- اژیرایی، ر.، کامکار، ب.، عبدی، ا.، ۱۳۹۴. اثر شاخص‌های مختلف استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای پهنه‌بندی شوری خاک در مزرعه نمونه ارتش گرگان، نشریه مدیریت خاک و توسعه پایدار، شماره ۱، صص ۱۸۰-۱۷۵.
- اسفندیاری، ف.، سرمستی، ن.، علوی‌پناه، ک.، ۱۳۹۴. پایش نمکزارهای مناطق خشک با پردازش داده‌های ماهواره‌ای، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۴۰، صص ۱۷۷-۱۵۱.
- حبشی، خ.، کریم‌زاده، ح.، پورمنافی، س.، ۱۳۹۶. ارزیابی شوری خاک در شرق اصفهان بر پایه داده‌های سنجنده OLI و تجزیه و تحلیل عوارض توپوگرافی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره اول، صص ۵۱-۳۶.
- خالقی، ر.، بهمنش، ج.، آزاد، ن.، ۱۳۹۸. پیش‌بینی شوری خاک با روش رگرسیون چند متغیره بر مبنای شاخص‌های استخراج شده از تصاویر لندست ۸ (مطالعه موردی: ارومیه)، تحقیقات کاربردی خاک، دوره ۷، شماره ۱، صص ۱۲۱-۱۰۸.
- خانمانی، ع.، جعفری، ر.، سنگونی، ح.، شهبازی، ع.، ۱۳۹۰. ارزیابی وضعیت خاک با استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت سگری اصفهان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۲(۳)، صص ۳۷-۲۵.
- خواجه‌الدین، س.ج.، ۱۳۸۶. روند بیابان‌زایی در ایران. جنگل و مرتع، شماره ۷۴، صص ۴۵-۴۲.
- کرم، ا.، کیانی، ط.، دادرسی سبزواری، ا.، داورزنی، ز.، ۱۳۹۸. برآورد شوری خاک با استفاده از داده‌های دورسنجی و آمار مکانی در منطقه سبزواری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، صص ۵۳-۳۱.
- متین‌فر، ح.، ظهرنیا، ع.، ۱۳۹۷. مقایسه شاخص‌های مختلف استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست به منظور بررسی تغییرات شوری خاک در منطقه جنوب غربی استان خوزستان، اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط زیست، صص ۸-۱. <https://civilica.com/doc/808498/>
- محمودی، ج.، کریم‌زاده، د.، فرید، ر.، حمیدرضا، ن.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی شوری خاک‌های منطقه جنوب شرق استان اصفهان با استفاده از داده‌های زمینی و سنجنده TM ماهواره‌ای. فصلنامه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۷۱، صص ۴۵-۳۱.
- مکرم، م.، نگهبان، س.، ۱۳۹۷. بررسی شوری آب و خاک و ارتباط آن با پستی و بلندی‌های سطح زمین با استفاده از مدل فازی در محیط GIS مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیخ دارنگون در غرب شیراز، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره ۱۰۵، صص ۱۵۷-۱۴۵.
- نیک‌پور، ن.، فتوحی، ص.، نگارش، ح.، بهرامی، ش.، حسینی، س.ز.، ۱۴۰۰. پایش شوری خاک در راستای تخریب سرزمین با کمک تکنیک‌های سنجش از دور (مطالعه موردی استان ایلام)، مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۲۷، صص ۲۰-۱.
- Ali R.R. & F.S. Moghanm. (2013). Variation of soil properties over the landforms around Idku lake, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 16, 91-101.
- Allbed, A., Kumar, L. (2013). Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: A review. *Advances in Remote Sensing* (2), 373-385.
- Allbed, A., kumar, L. and Sinha, P., (2014). Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the - Al Hasa oasis based one remote sensing indication and regression techniques. *Remote Sens* 6, 1137-1157.
- Elhag M. (2016). Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors*, 1-8.



- Amiraslani, F., Dragovich, D. (2011). Combating desertification in Iran over the last 50 years: an overview of changing approaches. *Journal of Environmental Management*, 92(1): 1-13.
- Azabdaftari, A. & Sunar, f., (2016). Soil salinity mapping multitemporal land sat data, *The International Archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences, VOI xl-B7, PP.809-813*.
- Bannari, A., Guedona, A. M., El-Hartib A., Cher-kaoui, Z. and El-Ghmari, A. (2008). Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39 (19-20): 2795-2811.
- Basile, A., Buttafuoco, G., Mele, G., Tedeschi, A. (2012). Complementary techniques to assess physical properties of a fine soil irrigated with saline water. *Environ Earth Sci* 66(7):1797–1807.
- Chhabra, R. (1996). *Soil salinity and water quality*. Taylor and Francis, Brookfield.
- Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Res* 83(2):270–277.
- Douaoui, A.E.K., Nicolas H. and Walter C. (2006). Detecting Salinity Hazards within a Semi-arid Context by Means of Combining Soil and Remote Sensing Data. *Geoderma*. 134(1-2): 217- 230.
- Elharti, A., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J., Hassouna, M., Bachaoui, E. and Ghmari, A., (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla plain (Morocco) using satellite spectral indices, *international journal of applied earth Observation and geoinformation* 50, 64-73.
- El-Keblawy, A., Abdelfattah, M.A., Khedr, A. (2015). Relationships between landforms, soil characteristics and dominant xerophytes in the hyperarid northern United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments* 117, 28-36.
- Fan, X., Liu, G., Tang, Z., Shu, L. (2010). Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta. *J Soil Water Conserv* 24(1):139–144.
- Fang H, Liu G, Kearney M (2005). Georelational analysis of soil type, soil salt content, landform, and land use in the Yellow River Delta, China. *Environ Manage* 35(1):72–80.
- Fernandez-Buces N, Siebe C, Cram S, Palacio J. (2006). Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 65(4): 644-667.
- Gallant, J.C., Wilson, J.P., (2000). Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, 51–85.
- Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D., (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143, 107–122.
- Henderson, B.L., E.N. Bui, C.J. Moran, D.A.P. Simon, (2005). Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. *Geoderma*, 124: 383-398.
- Hoa, P.V., Giang, N.V., Binh, N.A., Hai, L.V.H., Pham, T.D., Hasanlou, M. and Tien Bui, D., (2019). Soil Salinity Mapping Using SAR Sentinel-1 Data and Advanced Machine Learning Algorithms: A Case Study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam). *Remote Sens* 11(2), 1-20.
- Hoffman, G.J, Bresler, E. (1986). Irrigation management for soil salinity control: theories and tests. *Soil Sci Soc Am J* 50(6):1552–1560.
- Horn, B. K. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14-47.

- Huang, C., Xue, X., Wang, T., De Mascellis, R., Mele, G., You, Q., Peng, F., Tedeschi, A. (2011). Effects of saline water irrigation on soil properties in northwest China. *Environ Earth Sci* 63(4):701–708.
- Jenness, J., (2006). *Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) Extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. Jenness Enterprises.
- Khan, N.M., Rastoskuev, V., Sato, Y. and Shioza-wa, S., (2005). Assessment of Hydrosaline Land Degradation by Using a Simple Approach of Remote Sensing Indicators. *Agricultural Water Management*. 77 (1-3): 96-109
- Metternich, G. and Zinck, A., (2013). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Journal Remote sensing of environment*, Vol 85, pp.1-20.
- Mini, V., P.L. Patil and G.S. Dasog, (2007). A Remote sensing approach for establishing the soil physiographic relationship in the coastal Agro ecosystem of North Karnataka. *Karnataka J. Agric. Sci.*, 20(3): 524-530.
- Morgan, R.S., El Hady, M.A. and Rahim, I.S., (2018). Soil salinity mapping utilizing sentinel-2 and neural networks. *Indian Journal of Agricultural Research* 52 (5), 524-529.
- Nield S, Boettinger J, Ramsey R. (2007). Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 245-252.
- Northey J. E, Christen, E.W, Ayars, J.E, Jankowski, J. (2006). Occurrence and measurement of salinity stratification in shallow groundwater in the Murrumbidgee Irrigation Area, southeastern Australia. *Agric Water Manag* 81(1):23–40.
- Park, S.J., T.P. Burt, (2002). Identification and characterization of pedo-geomorphological processes on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1897-1910.
- Qi, Y., Chang, Q., Jia, K., Liu, M., Liu, J., Chen, T., (2012), Temporal-spatial variability of desertification in an Agro-pastoral transitional zone of Northern Shaanxi Province, China, *Journal of Catena*, Vol. 88, No. 1, 37-45.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., (2014), Generation of high-resolution global DSM from ALOS PRISM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-4, 243-248, ISPRS.
- Yu, R.T. and Liu, Y., Xu, c., Zhu, Q., Zhang, Z.Qu., (2010). Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao irrigation district of north china. *Journal of Agricultural water management* 97, 1952-1960.
- Wang S, Song X, Wang Q, Xiao G, Wang Z, Liu X, Wang P. (2012). Shallow ground water dynamics and origin of salinity at two sites in salinated and water-deficient region of North China Plain, China. *Environ Earth Sci* 66(3):729–73.
- Weiss, A. (2001). *Topographic Position and landforms Analysis*. Poster presentation, ESRI user Conference, San Diego, C.A.
- Whitney, K., Scudiero, E., El-Askary, H., Skaggs, T.H., Allali, M. and Corwin, D.L., (2018). Validating the use of MODIS time series fore salinity assessment over agricultural soils in California, USA. *Ecological indicators* 93, 889-898.
- Zhang, T., Zeng, S., Gao, Y., Ouyang, Z., Li, B., Fang, C., Zhao, B. (2011). Assessing impact of land uses on land salinization in the Yellow River Delta, China using an integrated and spatial statistical model. *Land Use Policy* 28(4):857–866.